

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Návrh pohonu obslužného vozítka
Design of Service Vehicle Drive

Rok 2012

Bc. Petr Novák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Novák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Návrh pohonu obslužného vozítka**
Design of Service Vehicle Drive

Zásady pro vypracování:

1. Návrh koncepce pohonu, určení jízdních odporů
2. Varianta s DC pohonem - návrh motoru a měniče
3. Varianta s AC pohonem - návrh motoru a měniče
4. Zhodnocení variant

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

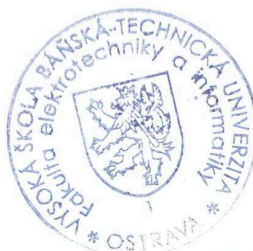
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, „ že jsem svou diplomovou práci na téma Návrh pohonu obslužného vozítka napsal samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Že jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou/diplomovou práci užít (§35 odst. 3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o /diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Novém Jičíně, dne 4. 5. 2012

.....
Petr Novák

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat své rodině a především pak své ženě za velkou podporu při studiu. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za konzultace a odborné vedení. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svému bývalému zaměstnavateli panu Ing. Jaromilu Spáčilovi za vstřícný přístup k mému studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem nového DC a AC pohonu pro obslužné vozítko. Tedy návrhem motoru a měniče. Návrh vychází z principu navrhování pohonu pro jeřáby a pojezdové mechanismy. Pro návrh pohonu musely být určeny jízdní odpory vozítka. Při návrhu bylo možné volit převodový poměr a průměr kol v určitém rozsahu. Pohon vozítka je napájen z trakční baterie. Jsou zde uvedeny základní možnosti nastavení použitých měničů a bloková zapojení pohonů. Na závěr je provedeno zhodnocení variant. Také jsou zde uvedeny odkazy na výrobce motorů a měničů určené pro bateriové aplikace.

Klíčová slova

Pohon; DC; AC; motor; měnič; pracovní cyklus; ekvivalentní moment; efektivní moment; ekvivalentní proud; zhoršené ochlazování; jízdní odpory

Abstract

This work deals with a new DC and AC drive of service vehicle. The proposal is for the motor and driver. The proposal is based on the principle of designing drive for cranes and sliding mechanisms. For the design of the drive had to be designed vehicle driving resistances. In this proposal there was a possibility of selection gear ratio and wheel diameter to some extent. The drive is supplied from the traction battery. There is basic options used drivers and block diagrams of the drive. Finally, an assessment options were done. There are also links to manufacturers of motors and drivers for battery applications.

Keywords

Drive; DC; AC; motor; controller; working cycle; effective moment; equivalent current; degraded cooling; driving resistances

Seznam použitých symbolů a zkratek

| | |
|--------------|--|
| AC | střídavý |
| AKB | akumulátorová baterie |
| AV | střední hodnota |
| C_x | je součinitel vzdušného odporu |
| CEL | celková |
| D | průměr kola [m] |
| DC | stejnoseměrný |
| F | síla [N] |
| F_{VAL} | odvalovací odpor [N] |
| F_{TR} | třecí odpor v ložiskách a bočním vedení [N] |
| F_S | odpor stoupání [N] |
| F_V | vzdušný odpor [N] |
| F_{Pos} | odpor od posuvných hmot [N] |
| K_{max} | průměr kola včetně průměru bočního vedení/lemu [m] |
| $K_{oz max}$ | průměr většího ozubeného kola (na hřídeli nápravy) [m] |
| I_a | proud kotvy motoru [A] |
| I_q | momentotvorná složka proudu kotvy AC motoru [A] |
| I_0 | proud motoru na prázdko [A] |
| J_{pMot} | moment setrvačnosti od posuvných hmot na hřídeli motoru [kgm^2] |
| J_p | moment setrvačnosti od posuvných hmot na straně PM [kgm^2] |
| M | moment [Nm] |
| M_{rMot} | moment motoru potřebný při rozjezdu vozítka na pracovní rychlost [Nm] |
| M_{rMot} | moment potřebný k urychlení rotujících hmot vyskytujících se na straně motoru při rozjezdu [Nm] |
| M_{prPM} | moment potřebný k urychlení posuvných a rotačních hmot vyskytujících se na straně pracovního mechanismu [Nm] |
| M_{doPM} | moment potřebný pro jízdu konstantní rychlostí do kopce na straně pracovního mechanismu – na kole [Nm] |

| | |
|-------------|---|
| M_{prPM} | moment potřebný k urychlení posuvných hmot (zátěže - vozítka) na straně pracovního mechanismu – na kole při rozjezdu [Nm] |
| M_{doPMk} | moment potřebný pro jízdu konstantní rychlostí do kopce na straně PM [Nm] |
| Mot | motor |
| P | výkon [W] |
| PM | pracovního mechanismus, permanentní magnety |
| Sx | je čelní plocha vozítka kolmá na směr pochybu [m ²] |
| $c\phi$ | součin konstrukční konstanty motoru a magnetického toku [Vs] |
| c_{TR} | součinitel stranového tření: 0,002 – 0,005 [-] |
| d | průměr hřídele [m] |
| do | do kopce |
| ekv | ekvivalentní |
| ef | efektivní |
| f | součinitel valivého odporu: 0,5 [mm] |
| j | jízda |
| i | převodový poměr [-] |
| l_o | obvod kola [m] |
| max | maximální |
| n | otáčky [ot/min] |
| nom | nominální |
| p | index převodu/převodovky |
| r | poloměr [m] |
| red | redukovaný |
| s | dráha [m] |
| v | je výsledná náporová rychlost proudění vzduchu kolem vozítka [m/s] |
| z | z kopce |
| α | zrychlení motoru během |
| π | Ludolfovo číslo |
| η | účinnost [-, %] |
| ω | úhlová rychlost [rad/sec] |
| ρ | je měrná hmotnost vzduch [kg/m ³] |
| 20 | index při které se RKV pohybuje rychlostí 20 km/h |
| 30 | index pro výpočty s průměrem kola vozítka 30 cm |

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 1 |
| 1. Návrh koncepce pohonu a určení jízdních odporů | 2 |
| 1.1. Vstupní parametry a technická data obslužného vozítka | 2 |
| 1.2. Koncepce pohonu | 3 |
| 1.3. Požadovaná funkce a pracovní cyklus obslužného vozítka | 4 |
| 1.4. Určení jízdních odporů | 5 |
| 1.4.1. Odvalovací a třecí odpor | 5 |
| 1.4.2. Vzdušný odpor | 7 |
| 1.4.3. Odpor stoupání | 9 |
| 1.4.4. Odpor zrychlení | 10 |
| 1.4.5. Celková hnací síla a výkon motoru pro jízdu konstantní rychlostí | 11 |
| 1.5. Kontrola adheze kola | 13 |
| 2. Princip návrhu motoru a měniče | 14 |
| 2.1. Parametry ovlivňující volbu motoru | 15 |
| 3. Varianta s DC pohonem - návrh motoru a měniče | 17 |
| 3.1. Volba typu DC motoru | 17 |
| 3.2. Určení DC převodu | 18 |
| 3.3. Určení veličin během rozběhu a brzdění - DC varianta | 19 |
| 3.4. Stanovení pracovního cyklu DC motoru | 20 |
| 3.5. Kontrola navrženého DC motoru | 22 |
| 3.6. Stanovení pracovního cyklu DC měniče | 27 |
| 3.7. Volba typu DC měniče | 29 |
| 3.8. Zapojení DC pohonu | 30 |
| 4. Varianta s AC pohonem - návrh motoru a měniče | 31 |
| 4.1. Volba typu AC motoru | 31 |
| 4.2. Určení AC převodu | 32 |
| 4.3. Určení veličin během rozběhu a brzdění - AC varianta | 33 |
| 4.4. Stanovení pracovního cyklu AC motoru | 34 |
| 4.5. Kontrola navrženého AC motoru | 36 |
| 4.6. Stanovení pracovního cyklu AC měniče | 39 |
| 4.6.1. Výpočet jednotlivých proudů AC měniče | 39 |

| | |
|--|----|
| 4.7. Volba typu AC měniče | 44 |
| 4.8. Zapojení AC pohonu | 45 |
| 5. Zhodnocení variant | 45 |
| 5.1. Dostupnost | 45 |
| 5.2. Rekuperace | 46 |
| 5.3. Komplikace při praktickém použití | 46 |
| 5.4. Statické a dynamické momenty | 46 |
| 5.5. Účinnost | 47 |
| 5.6. Využití pohonu | 49 |
| 5.7. Cena | 50 |
| 5.8. Výhody a nevýhody | 50 |
| 5.9. Shrnutí | 51 |
| Závěr | 52 |
| Literatura | 54 |
| Seznam příloh | 56 |

Úvod

Cílem této práce je návrh pohonu obslužného vozítka, které je určeno pro blíže nespecifikovaný výcvik. Jedná se o jednoúčelové zařízení, jehož vývoj navazuje na předchozí funkční prototyp, který bohužel nebyl zaveden do výroby. (A to především z důvodu vysoké ceny). Dalším krokem je tedy vyvinout nové, menší a hlavně levnější vozítko. To bude principiálně plnit stejný úkol jako jeho předchůdce.

Z minulého projektu byly k dispozici některé poznatky. Například to, že rekuperace přinese jen zanedbatelný zlomek energie nebo to, že potřebu pohonu všech kol je energeticky a zřejmě i cenově výhodnější řešit jinak než použitím dvou pohonů (každý pro jednu nápravu). Jsou zde také další rozdíly např.: ve velikosti, respektive v hmotnosti. Nová koncepce vozítka dále umožňuje větší variabilitu při návrhu pohonu. Konkrétně se jedná o možnost měnit, popřípadě přizpůsobit průměr kol obslužného vozítka a převodový poměr převodovky. To poskytuje větší prostor především pro výběr motoru.

První kapitola pojednává o konceptu pohonu a především o stanovení všech jízdních odporů. Ty jsou vypočteny na základě vstupních parametrů a technických dat vozítka. V druhé kapitole jsou popsány obecné principy návrhu motoru a měniče a také jsou zde vyčísleny teoretické možnosti variabilní části vstupních parametrů.

Na tomto základě je v třetí a čtvrté kapitole proveden návrh stejnosměrného a střídavého pohonu. Tedy výběr motoru, volba převodu a průměru kol. Dále stanovení pracovního cyklu a zpětná kontrola zvoleného motoru. Následně pak stanovení pracovního cyklu, výběr měniče a blokové schéma zapojení pohonu.

V páté kapitole jsem provedl porovnání a zhodnocení obou variant. Např. z hlediska ceny a dostupnosti komponentů, účinnosti, výhod a nevýhod jednotlivých variant. V závěru je celkové shrnutí s uvedením nejzajímavějších poznatků z návrhu pohonu.

Tato práce se nezabývá přesným řízením a ovládáním vozítka. To je samostatná kapitola, která by vydala na celou další práci. Předpokládá se, že nadřazený řídicí systém bude (následně) navržen tak, aby pokryl veškeré potřeby pro zajištění celkové funkce obslužného vozítka. Také se zde nezabývám konkrétní mechanickou konstrukcí pohonu. Tj. uchycení motoru, jeho spojení s hnací hřídelí apod. Tyto záležitosti byly průběžně konzultovány s konstruktérem mechanických částí vozítka.

1. Návrh koncepce pohonu a určení jízdních odporů

Návrh pohonu principiálně vychází z navrhování pohonů pro pojezdové mechanismy jeřábů a mobilních pracovních strojů.

Jako základ pro stanovení jízdních odporů a pracovního cyklu vozítka slouží vstupní parametry, technická data a požadovaná funkce obslužného vozítka (viz. kap.1.1). Z něj se stanoví pracovní cyklus pohonu, který je potřebný pro návrh konkrétního motoru a měniče.

1.1. Vstupní parametry a technická data obslužného vozítka

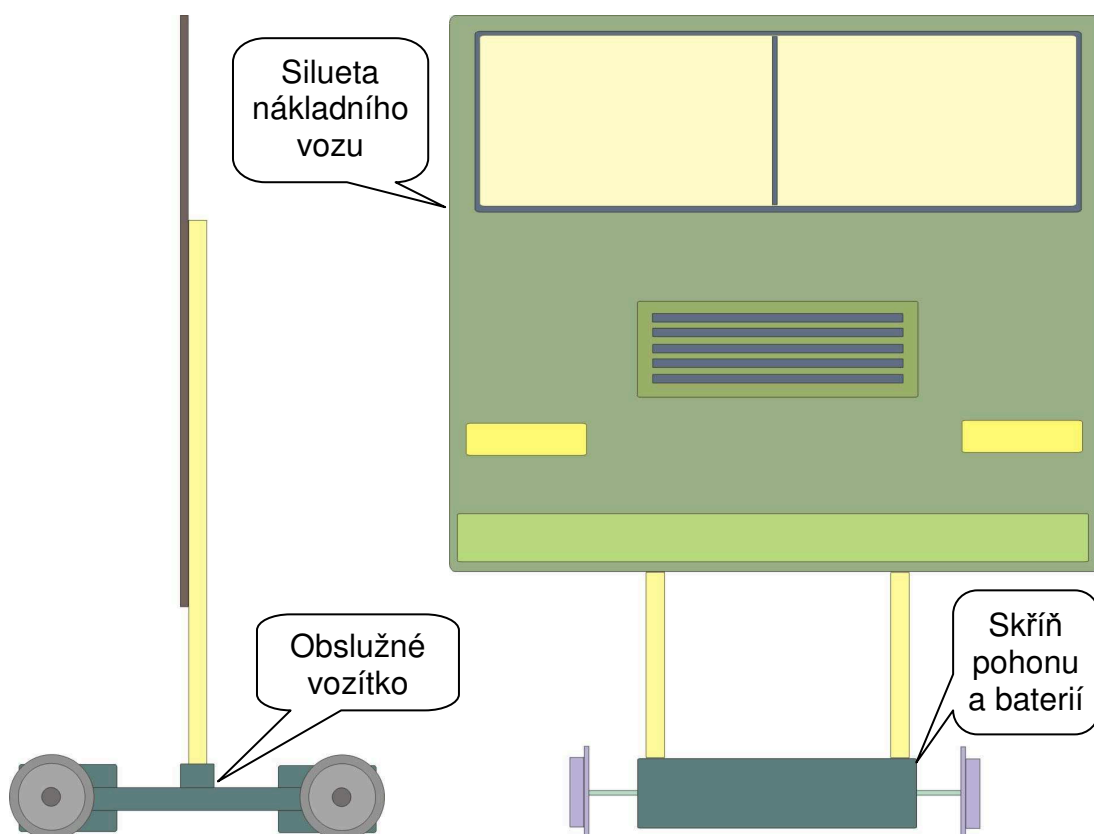
| | |
|-------------------------|---|
| Motor: | Jeden motor DC nebo AC. |
| Převodovka: | Bez převodovky nebo jednostupňová řetězová. Typová řada 10B. |
| Napájení: | Trakční olověná baterie 24 V/120 Ah nebo 36 V/, 80 Ah. |
| Měnič: | 2 nebo 4 kvadrantový, odolný proti zkratu, přetížení apod. |
| Počet náprav: | 2, z toho obě hnací – řetězové spojení (1:1) |
| Průměr hřídele kol: | $d = 20 \text{ mm}$ |
| Počet hnacích kol: | 4 |
| Zajištění proti pohybu: | Parkovací brzdou. (Nebude součástí návrhu – řeší mech. konstruktér.) |
| Ovládání: | Rádiovými povely. |
| Hmotnost: | 180 kg |
| Nosnost: | 120 kg |
| Pracovní teplota: | -20 až + 40 °C |
| Přibližné rozměry: | 1565 x 1600 x 300 mm |
| Průměr kol: | 200 – 300 mm (nesmí být menší než průměr většího převodového kola) |
| Materiál kol: | Ocel |
| Pracovní rychlost: | min. 20 km/h (při bezvětrí) |
| Rozjezd: | dosažení pracovní do 10 sec |
| Zastavení: | max. doba brzdění 8 sec |
| Minimální stoupavost: | 1 % |
| Délka dráhy: | 300 m |
| Rozchod kolejí: | 1435 mm |
| Rozměr terče: | 2,4 x 2,8 m |
| Max. pracovní cyklus: | 16krát tam a zpět za 8 hod a to 2x každých 60 min s 30 sec přestávkou |
| Využití vozítka: | 3 dny v týdnu a 3 týdny v měsíci |

1.2. Koncepce pohonu

Pohon obslužného vozítka je koncipován jako jednomotorový, ideálně bez převodovky nebo s jednostupňovým řetězovým převodem. Pohon bude napájen z olověných trakčních baterií a bude zajišťovat i brzdění vozítka. Brzdění může, ale také nemusí být rekuperační. Mezi významná kritéria návrhu patří cena, technická jednoduchost a dostupnost komponentů. Požadavek na dlouhou životnost pohonu dle mého názoru nepatří v tomto případě mezi hlavní priority. Viz. maximální pracovní cyklus a využití vozítka. Variabilní položkou návrhu je možnost měnit anebo zvolit (v určitém rozsahu dle zadání) průměr hnacích kol a převodový poměr převodovky.

Pro návrh pohonu je důležité znát požadovanou funkci, tedy požadovaný pracovní cyklus zařízení. Dále pak možné omezení pohonu např. z hlediska prostředí, chlazení, prostorových možností, řízení apod..

Přibližný náčrt obslužného vozítka je na obr.1. Hlavní části jsou nosná konstrukce, hnací hřídele a kola, baterie, měnič, motor, převodovka, rozvodovka, řídicí část a držák siluety.



Obr.1. Náčrt obslužného vozítka z boku a čelně.

1.3. Požadovaná funkce a pracovní cyklus obslužného vozítka

Vozítko se bude pohybovat po kolejové dráze o délce až 300 m a to tak, že výchozí poloha je na jedné ze dvou stran této dráhy. Požadavek je ujet dráhu 16x tam a zpět za 8 hodin. Konkrétně 2x tam a zpět každých 60 minut s 30 sekundovou přestávkou mezi jízdami. Rychlost jízdy po rozjezdu je 20 km/h. Doba rozjezdu má být do 10 vteřin a doba brzdění do 8 vteřin. Pro výpočet dráhy potřebné k rozjezdu, ze které se následně vypočte doba jízdy, bylo zapotřebí ještě určit zrychlení (1.1) či zpomalení (1.2) vozítka. Z těchto údajů jsem již mohl vypočítat dráhu potřebnou pro rozjezd (1.3) a brzdění (1.4). A následně délku dráhy (1.5) a dobu jízdy (1.6), po kterou jede vozítko konstantní rychlostí. Z těchto údajů jsem sestavil pracovní cyklus vozítka pro prvních 30 minut viz. Obr.2..

Zrychlení při rozjezdu:
$$a_r = \frac{v_{20}}{t} = \frac{5,56}{10} \doteq \underline{\underline{0,56 \text{ m/s}^2}} \quad (1.1)$$

Zrychlení při brzdění:
$$a_b = \frac{-v_{20}}{t_b} = \frac{-5,56}{8} \doteq \underline{\underline{-0,7 \text{ m/s}^2}} \quad (1.2)$$

Kde: v je rychlost vozítka 20 km/h = 5,56 m/s.

Dráha potřebná pro rozjezd:
$$s_r = \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot t_r^2 = \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot \left(\frac{v}{a_r} \right)^2 = \frac{v^2}{2 \cdot a_r} = \frac{5,56^2}{2 \cdot 0,56} = \underline{\underline{27,6 \text{ m}}} \quad (1.3)$$

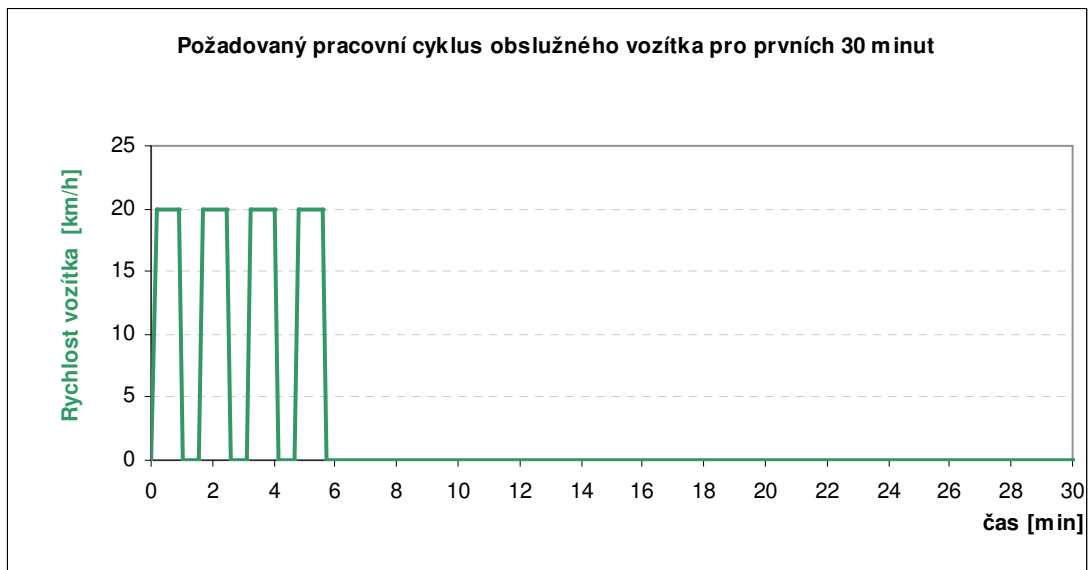
Dráha potřebná pro brzdění:
$$s_b = \frac{v^2}{2 \cdot |a_b|} = \frac{5,56^2}{2 \cdot 0,7} = \underline{\underline{22,1 \text{ m}}} \quad (1.4)$$

Délka dráhy po kterou jede vozítko konstantní rychlostí.

$$s_{cel} - (s_r + s_b) = 300 - (27,6 + 22,1) = \underline{\underline{250,3 \text{ m}}} \quad (1.5)$$

Doba jízdy vozítka konstantní rychlostí.

$$t_{jkr} = \frac{s_{cel} - (s_r + s_b)}{v} = \frac{300 - (27,6 + 22,1)}{5,56} \doteq \underline{\underline{45 \text{ sec}}} \quad (1.6)$$



Obr.2. Požadovaný pracovní cyklus vozítka pro prvních 30 minut.

1.4. Určení jízdních odporů

Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozítka. Celkový jízdní odpor se skládá z několika druhů odporů. Patří sem odpor odvalovací, který vzniká mezi kolem a povrchem, po kterém se kolo odvaluje. Další je vzdušný odpor. Ten ovlivňuje prostředí - vzduch, který vozítko obklopuje. Při zrychlování a mnohdy i při zpomalování musí vozítko lépe řečeno jeho pohon překonávat odpor zrychlení a při jízdě do svahu odpor stoupání. [1]

Protože se jedná o návrh pohonu na zařízení, které existuje jen na papíře a v hlavách konstruktérů, je potřeba určit / spočítat veškeré tyto jízdní odpory. Celý pohon se poté musí dimenzovat tak, aby pokryl kromě užitečného výkonu i tyto ztráty. Dle uvedené literatury a také podle [1] provedu výpočet všech potřebných jízdních odporů.

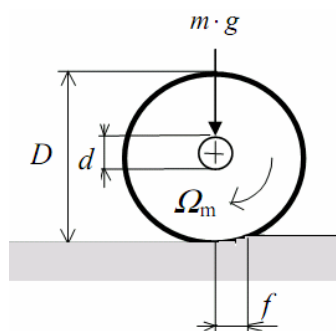
1.4.1. Odvalovací a třecí odpor

Odvalovací nebo také valivý odpor má pasivní charakter a působí vždy proti směru pohybu. Vzniká deformací kola a podkladu po kterém se kolo pohybuje. V našem případě kolejnice. Je také závislý na průměru kola, průměru náboje kola, rychlosti otáčení kola a úhlu stoupání. S úhlem stoupání, zmenšuje výsledný odpor, jsem zde nepočítal. Stejně tak rychlost otáčení kola jej výrazněji ovlivňuje až od vyšších rychlostí, takže i ta byla z výpočtů vypuštěna [1].

Třecí odpor vzniká třením bočních lemy kola a boku kolejnice. Lemy slouží k vedení kola a tedy k udržení vozítka na kolejích. Další tření vzniká v ložiskách kol.

Jelikož mám možnost volby průměru kol v rozmezí 200 – 300 mm, vypočtu valivý odpor pro obě tyto varianty. Pro další výpočty použiji bud' „horší variantu“ a to v případě, že rozdíly nebudou nikterak zásadní nebo provedu výpočet pro konkrétní průměr kola.

Při výpočtu (1.7) až (1.12) počítám s celkovou hmotností (a ne z ¼), takže výsledné odpory budou platit pro celé vozítko (pro všechny 4 kola). I když u výsledku při výpočtu bočního tření předpokládám, že samotného tření se „účastní“ maximálně pouze dva lemy. (V praxi není možné počítat s naprosto přesným rozchodem kolejnic a v tomto ohledu se předpokládá větší či menší vůle mezi lemy a kolejnicemi). Přesto zde budu počítat se třením všech 4 kol, (stejně jako v uvedené literatuře [3]), protože rozdíly vzhledem k velikosti koeficientu bočního tření nebudou v tomto případě nikterak zásadní.



Obr.3. Odvalovací odpor [3].

Výpočet odvalovacího odporu kol:
$$F_{VAL} = m \cdot g \cdot \frac{f}{1000} \cdot \frac{2}{D} \quad (1.7)$$

Kde f - je součinitel odvalovacího odporu a pro kov-kov je 0,5 mm [8]

Pro průměr kol 200 mm:
$$F_{VAL20} = m \cdot g \cdot \frac{f}{1000} \cdot \frac{2}{D_{20}} = 300 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,5}{1000} \cdot \frac{2}{0,2} \doteq 14,7 \text{ N} \quad (1.8)$$

Pro průměr kol 300 mm:
$$F_{VAL30} = m \cdot g \cdot \frac{f}{1000} \cdot \frac{2}{D_{30}} = 300 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,5}{1000} \cdot \frac{2}{0,3} \doteq 9,8 \text{ N} \quad (1.9)$$

Výpočet třecího odporu v ložiskách a bočním vedení: $F_{TR} = m \cdot g \cdot \left(\frac{d}{D} \cdot \mu_{TR} + c_{TR} \right)$ (1.10)

Literatura [3] uvádí měrný součinitel tření válečkového ložiska $\mu_{TR} = 0,005$.

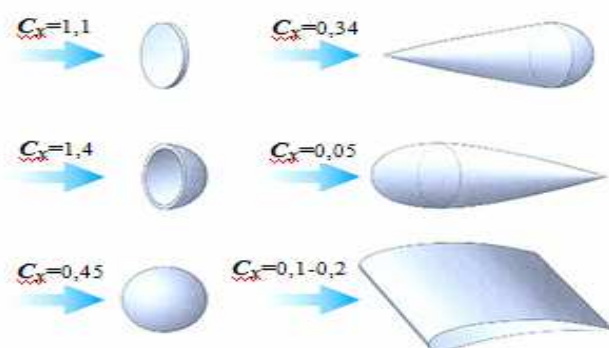
$$F_{TR20} = m \cdot g \cdot \left(\frac{d}{D_{20}} \cdot \mu_{TR} + c_{TR} \right) = 300 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{0,02}{0,2} \cdot 0,005 + 0,005 \right) \doteq \underline{\underline{16,2 \text{ N}}} \quad (1.11)$$

$$F_{TR30} = m \cdot g \cdot \left(\frac{d}{D_{30}} \cdot \mu_{TR} + c_{TR} \right) = 300 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{0,02}{0,3} \cdot 0,005 + 0,005 \right) \doteq \underline{\underline{15,7 \text{ N}}} \quad (1.12)$$

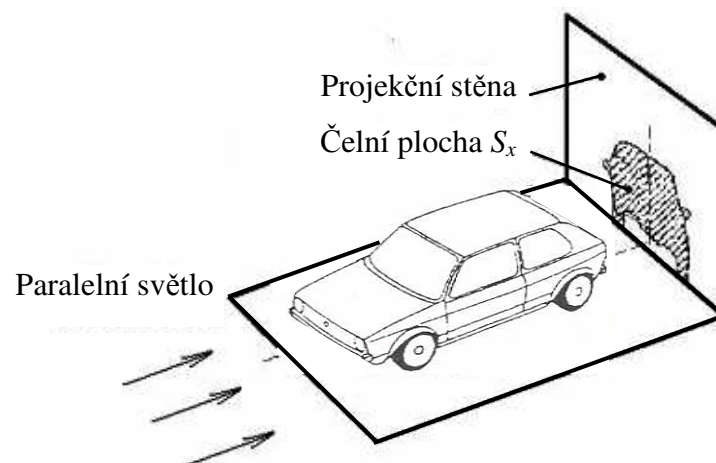
1.4.2. Vzdušný odpor

Vzdušný odpor obecně vzniká při proudění vzduchu kolem tělesa. Jinými slovy řečeno, jde o to, že při jízdě bude část vzduchu proudit kolem horní části vozítka a část se musí protlačit prostorem mezi spodní částí a povrchem terénu. Jeho velikost se mění s druhou mocninou výsledné náporové rychlosti vzduchu proudící kolem vozítka, a proto nabývá na významu při vyšších rychlostech. V porovnání s rychlostmi např. osobního automobilu respektive síly pro překonání výsledného vzdušného odporu [1] je rychlost našeho vozítka 20 km/h relativně nízká.

Další parametry, které ovlivňují výslednou velikost vzdušného odporu, je součinitel vzdušného odporu označován C_x , jehož velikost závisí na tvaru vozítka viz. obr.6 a je jej možné určit několika způsoby. Např. experimentálně z výsledků dojezdové zkoušky vozítka nebo v aerodynamickém tunelu [7]. Dále čelní plocha vozítka kolmá na směr pochybu s označením S_x viz. obr.5. a měrná hmotnost vzduchu ρ .

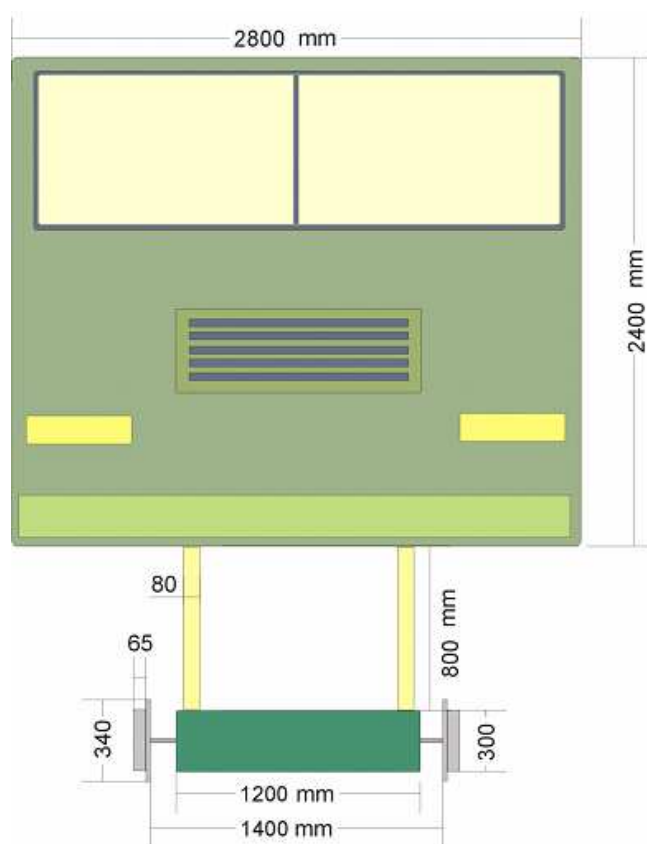


Obr.4. Součinitel vzdušného odporu C_x v závislosti na tvaru tělesa [7].



Obr.5. Zjištění čelní plochy objektu projekcí [4].

Výpočet parametru S_x jsem provedl na základě technických parametrů vozítka a siluety, které jsem překreslil viz. Obr.6..



Obr.6. Čelní pohled na vozítko se siluetou a rozměry potřebné k určení celkové plochy.

Výpočet celkové maximální plochy vozítka kolmé na směr pohybu:

| | |
|----------------------------|--|
| Plocha siluety: | $S_{Terč} = 2,4 \cdot 2,8 = 6,72 \text{ m}^2$ |
| Plocha nosných tyčí terče: | $S_{Tyčí} = 0,8 \cdot 0,08 \cdot 2 = 0,128 \text{ m}^2$ |
| Plocha kol: | $S_{Kol} = 0,065 \cdot 0,3 = 0,0195 \text{ m}^2$ |
| Plocha čela vozítka: | $S_{Čela} = 0,3 \cdot 1,2 = 0,36 \text{ m}^2$ |
| Celková plocha: | $S_{Cel} = 6,72 + 0,128 + 0,0195 + 0,36 = 7,2275 \doteq \underline{\underline{7,23 \text{ m}^2}} \quad (1.13)$ |

Výpočet vzdušného odporu vozítka:

Výpočet vzdušného odporu je vztažen k provozu vozítka za bezvětrí. V případě větru není požadováno dosažení rychlosti 20 km/h. Součinitel vzdušného odporu $C_x = 1,1$ jsem zvolil na základě Obr.4.

$$F_V = C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = 1,1 \cdot 7,23 \cdot \frac{1,25}{2} \cdot 5,56^2 = 153,66 \doteq \underline{\underline{154 \text{ N}}} \quad (1.14)$$

Kde:

v je výsledná náporová rychlost proudění vzduchu kolem vozítka

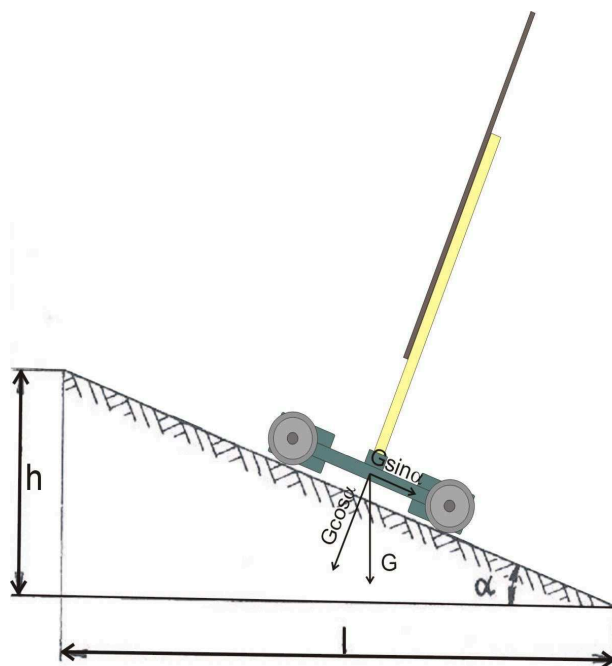
C_x je součinitel vzdušného odporu, viz. obr.4.

S_x je čelní plocha vozítka kolmá na směr pochybu

ρ je měrná hmotnost vzduchu (závisí na teplotě a tlaku), v praxi uvažujeme $1,25 \text{ kg/m}^3$, což platí pro tlak 1,013 bar a teplotu 15°C

1.4.3. Odpor stoupání

Odpor stoupání vzniká při jízdě vozidla na podélném svahu. Jeho velikost určuje složka tíhy vozidla obr.7., kde G je tíha vozidla a α je úhel, který svírá vodorovná rovina s rovinou vozovky. Znaménko $+$ je při jízdě do kopce a zvětšuje potřebnou sílu pro překonání jízdního odporu. Při jízdě z kopce označené znaménkem $-$ se tato síla, která vlastně vozidlo pohání, odečítá od celkové potřebné síly pro pohyb vozidla [1].



Obr.7. *Odpor stoupání. Vlastní úprava z [4].*

Dle požadavků na provoz vozítka má být dosaženo provozní rychlosti 20 km/h i při stoupání 1 %. Z toho vyplývá, že na délce dráhy $l = 100$ m překoná vozítko výškový rozdíl $h = 1$ m.

Síla potřebná k překonání odporu stoupání vozítka:

$$F_s = \pm G \cdot \sin \alpha = \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha = \pm m \cdot g \cdot \tan \alpha = \pm m \cdot g \cdot \frac{h}{l} = 300 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{100} \doteq \underline{\underline{29,4 \text{ N}}} \quad (1.15)$$

Kde pro malé úhly (stoupání $\leq 30\%$), platí že $\sin \alpha = \tan \alpha$.

1.4.4. Odpor zrychlení

Odpor zrychlení vzniká při změně rychlosti jízdy vozidla. Při zrychlování působí proti směru jízdy a při zpomalování po směru jízdy vozidla. Tento odpor se skládá ze dvou složek. Odporu zrychlení posuvných hmot a odporu zrychlení rotačních hmot [1]. Výpočet celkového odporu zrychlení je důležitý pro určení maximální síly potřebné k rozjezdu vozidla. Tedy ke stanovení maximálního (krátkodobého) momentu respektive výkonu motoru.

Nyní bychom mohli spočítat pouze odpor zrychlení posuvných hmot. Sílu pro jeho překonání vypočteme dle vztahu (1.16).

$$F_{Pos} = m \cdot \pm a \quad (1.16)$$

Kde m je hmotnost vozítka a $\pm a$ je zrychlení vozítka.

Pro výpočet odporu zrychlení rotačních hmot je nutné znát moment setrvačnosti motoru, převodového ústrojí a kol. Velikost prvních dvou zmíněných lze určit až po konkrétní volbě motoru. Na tomto místě tedy opustíme určení odporu zrychlení a zpět se k němu vrátíme v kapitole „Určení veličin během rozběhu a brzdění“.

1.4.5. Celková hnací síla a výkon motoru pro jízdu konstantní rychlostí

Celkovou sílu pro překonání všech jízdních odporů pro jízdu konstantní rychlostí 20 km/h, tedy kromě odporu zrychlení, určíme sečtením výše vypočtených sil (1.17). Z této síly pak určíme výkon motoru potřebný pro pohyb vozítka v ustáleném stavu.

Pro výpočet mechanického výkonu je potřeba určit ještě celkovou účinnost mechanických částí zde označenou n_{CEL} . V tomto případě se jedná o účinnost převodovky n_P a rozvodovky n_R (1.22). Ostatní mechanické ztráty jako např. tření v ložiskách nebo v bočním vedení jsou již započítány ve výše uvedených výpočtech jízdních odporů.

Dle zadání se v obou případech jedná o řetězové spojení jednoduchým řetězem. Podle [8] má toto uspořádání účinnost minimálně 97%.

Celková síla pro překonání jízdních odporů při konstantní rychlosti vozítka:

$$F_{CEL} = F_{VAL} + F_{TR} + F_V \pm F_S \quad (1.17)$$

Kde F_{VAL} - síla potřebná pro překonání valivého odporu

F_{TR} - síla potřebná pro překonání třecího odporu

F_V - síla potřebná pro překonání vzdušného odporu

F_S - síla potřebná pro překonání odporu stoupání/klesání

Potřebná síla pro jízdu do a z kopce ustálenou rychlostí při použití průměru kola 200 mm:

$$F_{doCEL20} = F_{VAL20} + F_{TR20} + F_V + F_S = 14,7 + 16,2 + 154 + 29,4 \doteq \underline{\underline{215 \text{ N}}} \quad (1.18)$$

$$F_{zCEL20} = F_{VAL20} + F_{TR20} + F_V - F_S = 14,7 + 16,2 + 154 - 29,4 \doteq \underline{\underline{156 \text{ N}}} \quad (1.19)$$

Význam indexů: *do* - do kopce

z - z kopce

20 respektive 30 označuje průměr kol v centimetrech

Potřebná síla pro jízdu do a z kopce ustálenou rychlostí při použití průměru kola 300 mm:

$$F_{doCEL30} = F_{VAL30} + F_{TR30} + F_V + F_S = 9,8 + 15,7 + 154 + 29,4 \doteq \underline{\underline{209 \text{ N}}} \quad (1.20)$$

$$F_{zCEL30} = F_{VAL30} + F_{TR30} + F_V - F_S = 9,8 + 15,7 + 154 - 29,4 \doteq \underline{\underline{150 \text{ N}}} \quad (1.21)$$

Celková účinnost mechanických částí:

$$n_{CEL} = n_p \cdot n_R = 0,97 \cdot 0,97 \doteq \underline{\underline{0,941}} \quad (1.22)$$

Poznámka: Zde je potřeba si uvědomit, že počítáme s normovanou účinností. Ve skutečnosti se účinnost převodovky a rozvodovky bude částečně měnit v závislosti převážně na rychlosti vozítka.

Výkon motoru pro konstantní rychlost při jízdě do kopce a použití průměru kola 200 mm:

$$P_{Mot20} = \frac{F_{CEL20} \cdot v}{n_{CEL}} = \frac{215 \cdot 5,56}{0,941} \doteq \underline{\underline{1270 \text{ W}}} \quad (1.23)$$

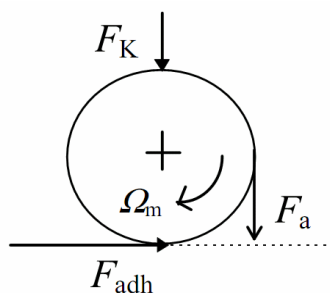
Výkon motoru pro konstantní rychlost při jízdě do kopce a použití průměru kola 300 mm:

$$P_{Mot30} = \frac{F_{CEL30} \cdot v}{n_{CEL}} = \frac{209 \cdot 5,56}{0,941} \doteq \underline{\underline{1235 \text{ W}}} \quad (1.24)$$

Výše vypočtený výkon slouží jen jako orientační hodnota, podle které budu volit (odhadovat) typovou velikost motoru. Pak je provedu ověření zvoleného motoru.

1.5. Kontrola adheze kola

Adheze je schopnost přilnutí k sobě dvou různých materiálů. To umožní přenos sil v našem případě mezi kolem a kolejnicí a umožní tak pohyb vozítka. Ovšem jen za předpokladu splnění podmínky $F_{adh} \succ F_a$. Tedy, že adhezivní síla F_{adh} , která je největší silou, kterou je schopné kolo převést při dané svislé síle F_K , bude větší než síla F_a na hnacích kolech. Velikost adhezivní síly závisí na povrchu obou materiálů a vypočítá se dle (1.27), kde μ je součinitel adhezivního tření. Ten je pro každý materiál povrchu, přesněji řečeno pro každou kombinaci materiálů odlišný. Pro kombinaci kov-kov je $\mu = 0,15$ [6]. Kontrola je provedena pro „horší“ případ, tedy pro brzdění z kopce. Zde je absolutní hodnota záporného zrychlení větší než pro rozjezd a síla potřebná pro překonání odporu stoupání F_s (1.14) viz. kapitola 1.4.3., působí při jízdě z kopce tak, že snižuje celkovou sílu působící na kolo a tedy zhoršuje adhezi.



Obr.8. Adhezivní síla [1].

Síla působící svisle na jedno kolo:

$$F_K = \frac{m \cdot g - F_s}{N_K} = \frac{300 \cdot 9,81 - 29,4}{4} \doteq \underline{\underline{728 \text{ N}}} \quad (1.25)$$

N_K - počet kol na které se rozloží celková váha

F_s - síla potřebná k překonání odporu stoupání vozítka

Urychlující síla na hnacím kole působící lineárně zrychlený případně zpomalený pohyb stroje:

$$\text{Při brzdění: } F_{ab} = \frac{m \cdot a_b}{N_{HK}} = \frac{300 \cdot |-0,7|}{4} = \underline{\underline{52,5 \text{ N}}} \quad (1.26)$$

Kde N_{HK} je počet hnacích kol.

$$\text{Adhezní síla. } F_{adh} = F_K \cdot \mu = 728 \cdot 0,15 = \underline{\underline{109 \text{ N}}} \quad (1.27)$$

$$\text{Podmínka adheze. } F_{adh} \succ F_{ab} \Rightarrow 109 \text{ N} \succ 52,5 \text{ N} \rightarrow \underline{\underline{\text{OK}}} \quad (1.28)$$

2. Princip návrhu motoru a měniče

Návrh motoru vychází z principu dimenzování pro pojezdové mechanismy jeřábů a mobilních pracovních strojů [3].

Obecně lze říci, že návrh motoru vychází z (ideálního) předpokladu a to, že výkon respektive oteplení motoru, který pracuje v požadovaném pracovním cyklu, se má co nejvíce blížit jeho maximálnímu dovolenému oteplení. Takto navržený motor je z pohledu využití a tedy i z ekonomického hlediska ideálním řešením. Bohužel v mnoha případech se tento záměr z různých technických či technologických požadavků nepodaří splnit. A navržený motor je více či méně předimenzován.

Postup návrhu motoru je následující:

- Analýza požadavků a druh zatížení motoru.
- Předběžná volba typu motoru.
- Určení veličin během rozběhu a brzdění.
- Výpočet momentů potřebných k rozjezdu a brzdění vozítka.
- Kontrola navrženého motoru.

Při každém návrhu pohonu je nutné znát nebo určit požadovaný typ zatížení a podle něj pak stanovit metodu návrhu motoru. Pracovní cyklus obslužného vozítka uvedený v kapitole 1.3. naznačuje, jak bude vypadat pracovní cyklus motoru. Dle [3] je to deseti minutový úsek s největším zatížením. V našem případě to bude přímo prvních deset minut pracovního cyklu

vozítka. Druh zatížení se dle mého názoru nejvíce podobá přerušovanému zatížení S3. Pro takový typ zatížení motoru se použije metoda ekvivalentního momentu.

Při výpočtech proto pominu zohlednění zhoršeného ochlazování motoru po dobu rozjezdu a brzdění. Tyto časy představují relativně malou část pracovního cyklu a také proto, že navržené motory bývají většinou vzhledem k malému statickému zatížení značně předimenzovány [3].

Návrh měniče je principiálně podobný, s tím rozdílem, že stanovení velikosti měniče se určí metodou efektivního proudu a dle normy se počítá jen s poloviční dobou. Závislost proudů na čase pro sestavení pracovního cyklu měniče a následný výpočet stanovíme na základě dodaných dat k motorům, případně je z těchto parametrů dopočítáme. Na základě výsledného efektivního proudu a maximálního proudu z pracovního cyklu se provede volba měniče.

2.1. Parametry ovlivňující volbu motoru

V této kapitole vymezím mantinely pro možné volby převodového pohonu a průměru kol. Tyto informace se budou hodit jak při určování jízdních odporů, tak při hledání vhodného motoru.

Podle zadání je možné použití průměru kol od 200 do 300 mm a převodového poměru v takovém rozmezí, aby větší kolo převodového kola mělo maximálně stejný nebo menší průměr jako kola vozíku bez lemu pro boční vedení. Pro stanovení teoretického rozsahu otáček motoru je potřeba znát otáčky kol a to jak v závislosti na převodovém poměru, tak v závislosti na průměru kola respektive obvodu kola.

Výpočet obvodu kola vozítka při průměru kol 200 a 300 mm.

$$l_o = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (2.1)$$

$$l_{o20} = 2 \cdot \pi \cdot 0,1 = \underline{\underline{0,6283 \text{ m}}} \quad (2.2)$$

$$l_{o30} = 2 \cdot \pi \cdot 0,15 = \underline{\underline{0,9425 \text{ m}}} \quad (2.3)$$

Kde: l_o je obvod kola

r je poloměr kola

a číslovky 20 a 30 jsou indexi označující průměry kol v milimetrech

Výpočet otáček kol vozítka pro rychlost 20 km/h a otáček motoru pro převod 1:1

Otáčky kola:

$$n_K = \frac{\text{rychlost vozítka}}{\text{obvod kola}} \cdot 60 \quad (2.4)$$

$$n_{K20} = \frac{5,56}{0,6283} \cdot 60 \doteq \underline{\underline{531 \text{ ot/min}}} \quad (2.5)$$

$$n_{K30} = \frac{5,56}{0,9425} \cdot 60 \doteq \underline{\underline{354 \text{ ot/min}}} \quad (2.6)$$

Pro výpočet rozsahu otáček motoru je potřeba určit možný rozsah převodových poměrů. Dle zadání je převodovka jednostupňová řetězová. Výběr jednořadých ozubených kol z typové řady 10B viz. [9], typ ozubeného kola 10B-1-08-N s 8 zuby, bude na hřídeli motoru. Výsledný převod se vypočítá jako poměr zubů většího kola k těmto 8 zubům. Samozřejmě je potřeba dodržet následující podmínku zadání (2.7)

$$\phi K_{\max} \succ \phi K_{oz \max} \quad (2.7)$$

ϕK_{\max} - průměr kol obslužného vozítka

$\phi K_{oz \max}$ - průměr většího ozubeného kola (na hřídeli nápravy)

Z těchto údajů jsem sestavil tabulku 1. možných kombinací převodového poměru a průměru kol.

| Typ ozubeného kola | počet zubů | průměr ozubeného kola [mm] | průměr kola vozítka [mm] | Výsledný převod ip |
|--------------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|
| 10B-1-38-N | 38 | 199,2 | 200 | 4,75 |
| 10B-1-58-N | 58 | 300,7 | 300 | 7,25 |

Tab.1 Maximálně možný převodový poměr vzhledem k průměru kol obslužného vozítka.

Rozpětí možných převodových poměrů pro průměr kol vozítka 200 – 300 mm:

$$i_{p20} - 1:1 \text{ až } 1:4,75 \quad (2.8)$$

$$i_{p30} - 1:1 \text{ až } 1:7,25$$

Rozsah možných nominálních otáček motoru:

$$n_{Mot} = n_K \cdot i_p \quad (2.9)$$

$$n_{Mot20} = n_{K20} \cdot i_{p20} = 531 \cdot 1 \div 4,75 = \underline{\underline{531 \div 2522 \text{ ot/min}}} \quad (2.10)$$

$$n_{Mot30} = n_{K30} \cdot i_{p30} = 354 \cdot 1 \div 7,25 = \underline{\underline{354 \div 2566 \text{ ot/min}}} \quad (2.11)$$

3. Varianta s DC pohonem - návrh motoru a měniče

Nyní použijí teorie a výpočty pro návrh motoru a měniče, uvedené v předchozích kapitolách.

Z výše uvedených výpočtů je vidět, že nominální otáčky motoru se mohou vzhledem k určité variabilitě zadání, pohybovat minimálně v rozmezí 531 – 2566 ot/min. Otáčky mohou být samozřejmě ještě o něco větší i menší. Protože motor může být provozován v režimu do nominálních otáček respektive v odbuzeném stavu. Toto je jistě alespoň teoretická výhoda z hlediska výběru motoru.

3.1. Volba typu DC motoru

Na tomto místě je potřeba zvolit (odhadnout) konkrétní typ motoru. Z několika nalezených typů motorů jsem zvolil motor P2WY622 českého výrobce. Pro uvedený motor jsem se rozhodl na základě požadavků na dobrou dostupnost, nízkou cenu a užitnou hodnotu popřípadě vytíženost vozítka, která dle mého názoru je celkem malá. Nominální parametry motoru se vztahovaly k provozu S1 Viz. tab.2.

| Parametry DC motoru P2WY622 (4 pólový s permanantními magnety) | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|-------|-----------------|--------|--------|------------------|-------------|-------------------------|------------------------|----------|
| Výrobce | Provoz | Výkon | Proud | Maximální proud | Napětí | Moment | Maximální moment | Otáčky | Otáčky při max. momentu | Moment setrvačnosti | Účinnost |
| ATAS elektromotory Náchod a.s. | S1 | 2,1 kW | 67 A | 142 A | 36 V | 6,8 Nm | 15 Nm 1 min | 2960 ot/min | 2527 ot/min | 0,007 kgm ² | 0,87 |

Tab.2 Parametry DC motoru P2WY622.

3.2. Určení DC převodu

Výpočet převodového poměru provedeme na základě otáček zvoleného DC motoru, které přibližně odpovídají jeho maximálnímu možnému zatížení. Jinými slovy řečeno, pro výpočet převodu zvolím otáčky motoru, při kterých motor poskytuje největší (krátkodobý) moment. Následně při kontrole maximálního momentu motoru hned zjistím, zdali je návrh v pořádku.

Pro DC variantu jsem zvolil vzhledem k otáčkám motoru nejmenší možný průměr kol vozítka a to $D_{DC} = 200$ mm.

Maximální převodový poměr při maximálním možném zatížení DC motoru:

$$i_{pDC} = \frac{n_{Mot} \cdot l_O}{v \cdot 60} = \frac{n_{Mot} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{v \cdot 60} = \frac{n_{Mot} \cdot \pi \cdot D_{DC}}{v \cdot 60} = \frac{2527 \cdot \pi \cdot 0,2}{5,56 \cdot 60} \doteq \underline{\underline{4,76}} \quad (3.1)$$

n_{Mot} – Otáčky motoru (2527 ot/min), při kterých zvolený motor krátkodobě poskytne max. moment 15 Nm, viz. tab.P1.

Výběr převodového kola byl vzhledem k vypočtenému 4,76 jednoduchý. Výsledný převod jsem zvolil maximálně možný, tedy $i_{pDC} = 4,75$ viz. tab.1.

3.3. Určení veličin během rozběhu a brzdění - DC varianta

Zde je potřeba určit rotační setrvačné hmoty na straně motoru a na straně pracovního mechanismu - PM.

Na straně motoru to jsou momenty setrvačnosti spojky (spojuje hřídel motoru a malé ozubené kolo) a převodovky (malé ozubené kolo a část řetězu). Ty obecně představují malou část celkového momentu setrvačnosti a často se uvažují jako paušální část momentu setrvačnosti motoru [3]. Tohoto předpokladu jsem také využil a pro výpočet použil koeficient 0,15 viz. (3.4).

Z doby rozběhu a brzdění obslužného vozítka je potřeba vypočítat zrychlení motoru a následně moment potřebný k urychlení rotujících částí na straně motoru. To je tzv. vlastní urychlovací moment motoru.

Na straně PM je třeba určit rotační a posuvné setrvačné hmoty, tj. na výstupu převodovky. Přesný výpočet rotačních hmot na straně PM viz. (3.9) a (3.10) by byl komplikovanější, protože nebyly k dispozici některé vstupní parametry, jako jsou např. hmotnost a přesná konstrukce kol vozítka. Také zde jsem tuto hodnotu určil pomocí paušálního určení velikosti rotačních hmot výpočtem podle literatury [3]. Součinitele rotačních částí ϑ , který se ve vztahu vyskytuje, jsem vzhledem ke „složitosti“ a „mohutnosti“ převodu a rozvodu zvolil (odhadl na základě porovnání ϑ pro osobní automobily viz. [4]), $\vartheta=1,1$.

Moment setrvačnosti od posuvných hmot vyskytujících se na straně pracovního mechanismu-PM:

$$J_{pPMDC} = m \cdot \left(\frac{D_{DC}}{2} \right)^2 = m \cdot \frac{D_{DC}^2}{4} = 300 \cdot \frac{0,2^2}{4} = \underline{\underline{3 \text{ kgm}^2}} \quad (3.2)$$

Moment setrvačnosti od posuvných hmot přepočtený na stranu hřídele motoru:

$$J_{pMotDC} = \frac{J_{pPMDC}}{i_{pDC}^2} = \frac{3}{4,75^2} = \underline{\underline{0,133 \text{ kgm}^2}} \quad (3.3)$$

Moment setrvačnosti rotačních hmot vyskytujících se na straně motoru:

$$J_{RotMotDC} = \Sigma J \cong (0,1 \div 0,2) \cdot J_{MotDC} = 0,15 \cdot 0,007 \div \underline{\underline{0,00105 \text{ kgm}^2}} \quad (3.4)$$

J_{MotDC} - Moment setrvačnosti rotoru DC motoru, viz. tab.2.

Doba rozjezdu vozítka: $t_r = 10\text{ s}$

Doba brzdění vozítka: $t_b = 8\text{ s}$

Zrychlení motoru během rozjezdu:

$$\alpha_{rMotDC} = \frac{v}{t_r} \cdot \frac{2 \cdot i_{pDC}}{D_{DC}} = \frac{5,56}{10} \cdot \frac{2 \cdot 4,75}{0,2} \doteq \underline{\underline{26,41 \text{ rad/s}^2}} \quad (3.5)$$

Zpomalení motoru během brzdění:

$$\alpha_{bMotDC} = \frac{-v_{20}}{t_b} \cdot \frac{2 \cdot i_{pDC}}{D_{DC}} = \frac{-5,56}{8} \cdot \frac{2 \cdot 4,75}{0,2} \doteq \underline{\underline{-33,01 \text{ rad/s}^2}} \quad (3.6)$$

Moment potřebný k urychlení rotujících hmot na straně motoru (vlastní urychlovací moment):

$$M_{rRotMotDC} = (J_{MotDC} + J_{RotMotDC}) \cdot \alpha_{rMotDC} = (0,007 + 0,00105) \cdot 26,41 \doteq \underline{\underline{0,21 \text{ Nm}}} \quad (3.7)$$

Moment potřebný ke zpomalení rotujících hmot na straně motoru (vlastní zpomalovací moment):

$$M_{bRotMotDC} = (J_{MotDC} + J_{RotMotDC}) \cdot \alpha_{bMotDC} = (0,007 + 0,00105) \cdot -33,01 \doteq \underline{\underline{-0,27 \text{ Nm}}} \quad (3.8)$$

Moment potřebný k urychlení posuvných a rotačních hmot vyskytujících se na straně PM:

$$M_{rpPMDC} = J_{pMotDC} \cdot \alpha_{rMotDC} \cdot i_{pDC} \cdot \vartheta = 0,133 \cdot 26,41 \cdot 4,75 \cdot 1,1 \doteq \underline{\underline{18,4 \text{ Nm}}} \quad (3.9)$$

Moment potřebný k brzdění posuvných a rotačních hmot vyskytujících se na straně PM:

$$M_{bpPMDC} = J_{pMotDC} \cdot \alpha_{bMotDC} \cdot i_{pDC} \cdot \vartheta = 0,133 \cdot -33,01 \cdot 4,75 \cdot 1,1 \doteq \underline{\underline{-23 \text{ Nm}}} \quad (3.10)$$

3.4. Stanovení pracovního cyklu DC motoru

Nyní již máme k dispozici veškeré údaje potřebné k výpočtu momentů jednotlivých částí pracovního cyklu motoru. Tedy dynamických momentů pro rozjezd a brzdění vozítka a statických momentů pro jízdu obslužného vozítka konstantní rychlostí 20 km/h.

Moment motoru potřebný pro jízdu vozítka konstantní rychlostí z a do kopce:

$$M_{doMotDC} = F_{doCEL20} \cdot \frac{D_{DC}}{2} \cdot \frac{1}{i_{pDC} \cdot \eta_{CEL}} = 215 \cdot \frac{0,2}{2} \cdot \frac{1}{4,75 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{4,8 \text{ Nm}}} \quad (3.11)$$

$$M_{zMotDC} = F_{zCEL20} \cdot \frac{D_{DC}}{2} \cdot \frac{1}{i_{pDC} \cdot \eta_{CEL}} = 156 \cdot \frac{0,2}{2} \cdot \frac{1}{4,75 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{3,5 \text{ Nm}}} \quad (3.12)$$

η_{CEL} - mechanická účinnost převodovky a rozvodovky, viz. kapitola 1.4.5.

Moment motoru potřebný k rozjezdu vozítka na pracovní rychlost do a z kopce:

$$M_{rdoMotDC} = M_{rMotDC} + (M_{prPMDC} + M_{doPMDC}) \cdot \frac{1}{i_{pDC} \cdot \eta_{CEL}} = 0,21 + (18,4 + 21,5) \cdot \frac{1}{4,75 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{9,2 \text{ Nm}}} \quad (3.13)$$

$$M_{rzMotDC} = M_{rMotDC} + (M_{prPMDC} + M_{zPMDC}) \cdot \frac{1}{i_{pDC} \cdot \eta_{CEL}} = 0,21 + (18,4 + 15,6) \cdot \frac{1}{4,75 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{7,9 \text{ Nm}}} \quad (3.14)$$

Moment na straně motoru potřebný k brzdění při jízdě do a z kopce:

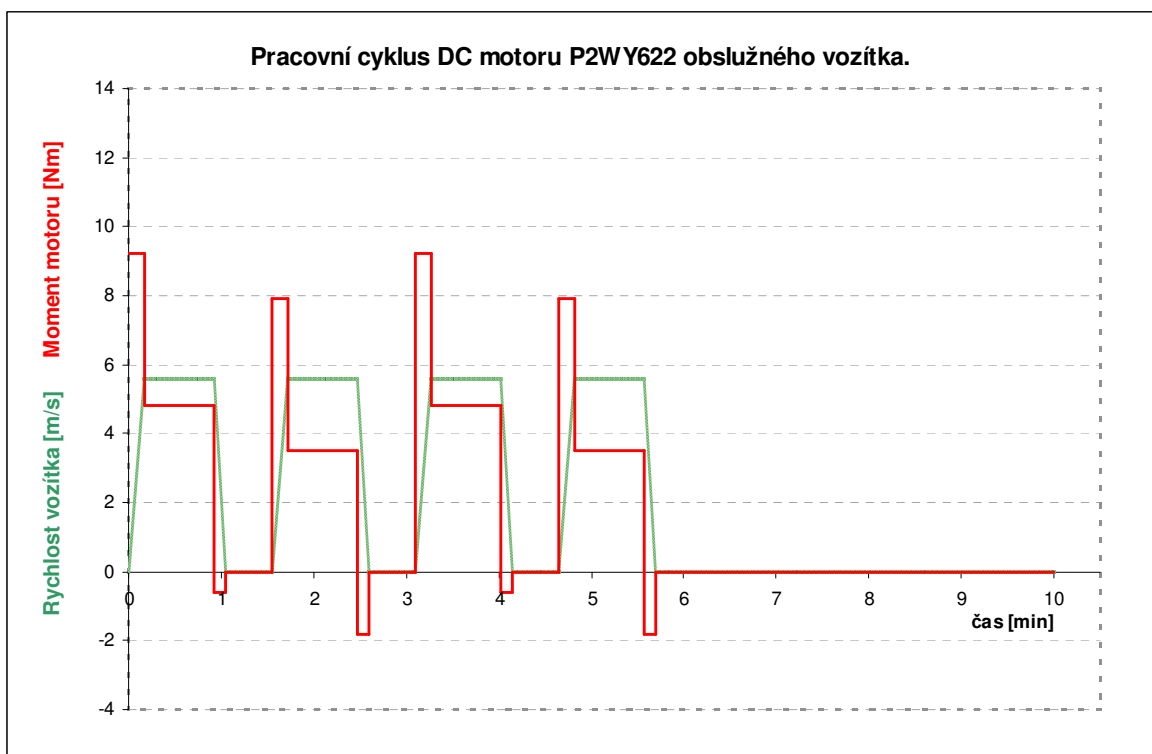
$$M_{bdoMotDC} = M_{bMotDC} + (M_{pbPMDC} + M_{doPMDC}) \cdot \frac{\eta_{CEL}}{i_{pDC}} = -0,27 + (-23 + 21,5) \cdot \frac{0,941}{4,75} \doteq \underline{\underline{-0,6 \text{ Nm}}} \quad (3.15)$$

$$M_{bzMotDC} = M_{bMotDC} + (M_{pbPMDC} + M_{zPMDC}) \cdot \frac{\eta_{CEL}}{i_{pDC}} = -0,27 + (-23 + 15,6) \cdot \frac{0,941}{4,75} \doteq \underline{\underline{-1,8 \text{ Nm}}} \quad (3.16)$$

Výsledný pracovní cyklus motoru je shrnut do tab.3 a také na obr.9.

| Pracovní cyklus DC motoru P2WY622 - celkový čas 10 min. | | | | | | | | |
|---|---------------------|-------------------|---------------------|-----------|--------------------|------------------|--------------------|-----------|
| Stav | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Brzdění do kopce | Přestávka | Rozjezd z kopce | Jízda z kopce | Brzdění z kopce | Přestávka |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 30 |
| Moment [Nm] | 9,2 | 4,8 | -0,6 | 0 | 7,9 | 3,5 | -1,8 | 0 |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 258 |
| Moment [Nm] | 9,2 | 4,8 | -0,6 | 0 | 7,9 | 3,5 | -1,8 | 0 |

Tab.3 Pracovní cyklus DC motoru P2WY622.



Obr.9 Pracovní cyklus DC motoru P2WY622.

3.5. Kontrola navrženého DC motoru

Poslední, ale důležitá část při návrhu motoru pro pojezdové mechanismy jeřábů a mobilních pracovních strojů, který jsem zvolil pro toto obslužné vozítko, je jeho kontrola z hlediska maximální momentové přetížitelnosti případně z hlediska ekvivalentního momentu, který musí být menší než nominálního momentu zvoleného motoru.

Doporučená přetížitelnost motoru tzv. bezpečnostní rezerva, je dle literatury [5] cca + 30% z maximálního požadovaného momentu. (Maximálního momentu, který se vyskytuje v pracovním cyklu motoru). Je to z důvodů kolísání napájecího napětí, účinnosti měniče aj.. Samozřejmě je potřeba, aby tento maximální moment byl možný při požadovaných otáčkách.

Požadovaný maximální moment DC motoru s ohledem na bezpečnostní rezervu:

$$M_{\max Rez} = M_{rdoMotDC} + 30\% = M_{rdoMotDC} \cdot 1,3 = 9,2 \cdot 1,3 = \underline{\underline{12 \text{ Nm}}} \quad (3.17)$$

$$M_{MaxDC} \succ M_{maxRez} \rightarrow 15 \text{ Nm} \succ 12 \text{ Nm} \rightarrow \underline{\underline{OK}} \quad (3.18)$$

$M_{\max Rez}$ - moment, kterým by měl být motor schopen poskytnout

M_{MaxDC} - maximální moment motoru při otáčkách 2527 ot/min viz. tab.P1.

Z tab.P1 je vidět že motor dokáže moment M_{MaxDC} poskytnout i pro požadované otáčky.

Motor tedy z hlediska doporučení (minimální) momentové bezpečnosti vyhoví.

Protože zvolené pracovní otáčky DC motoru 2527 ot/min, jsou pro převážnou část pracovního cyklu menší než nominální otáčky motoru (2960 ot/min), je potřeba změnit metodu výpočtu ekvivalentního momentu na metodu efektivního momentu. Tato metoda lépe zohledňuje zhoršené ochlazování motoru. Stručně řečeno, efektivní moment respektuje oteplovací efekt a je větší než ekvivalentní moment (3.19), který má stejný ztrátový efekt. Je to dáno právě zhoršeným ochlazováním při práci motoru do nominálních otáček a při práci motoru v odbuzeném stavu. Efektivní moment (3.21) platí pro celý rozsah otáček motoru. I tak pro informaci a následné porovnání uvedu také výpočet ekvivalentního momentu.

Výpočet ekvivalentního momentu motoru:

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T M^2 dt} = \quad (3.19)$$

$$= \sqrt{\frac{(M_{rdoMotDC}^2 \cdot \Delta t_r + M_{doMotDC}^2 \cdot \Delta t_j + M_{bdoMotDC}^2 \cdot \Delta t_b + M_{rzMotDC}^2 \cdot \Delta t_r + M_{zMotDC}^2 \cdot \Delta t_j + M_{bzMotDC}^2 \cdot \Delta t_b) \cdot 2}{t_{MotNorm}}}$$

Kde: t_j je čas jízdy konstantní rychlostí, viz. kapitola 1.3..

$t_{MotNorm}$ je normovaná doba pracovního cyklu motoru 10 min, tedy 600 s.

Ekvivalentní moment DC motoru:

$$M_{ekvDC} = \sqrt{\frac{(9,2^2 \cdot 10 + 4,8^2 \cdot 45 + (-0,6)^2 \cdot 8 + 7,9^2 \cdot 10 + 3,5^2 \cdot 45 + (-1,8)^2 \cdot 8) \cdot 2}{600}} = \underline{\underline{3,2 \text{ Nm}}} \quad (3.20)$$

Výpočet efektivního momentu motoru:

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{M_i^2}{\beta_i} \cdot t_i}{\beta_0 \cdot t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}} = \sqrt{\frac{\frac{M_1^2}{\beta_1} \cdot t_1 + \frac{M_2^2}{\beta_2} \cdot t_2 + \frac{M_3^2}{\beta_3} \cdot t_3 \dots}{\beta_0 \cdot t_0 + t_1 + t_2 + t_3 \dots}} \quad (3.21)$$

Kde:

M_i je suma všech momentů pracovního cyklu motoru

$M_{1,2,3,\dots}$ jsou dílčí momenty pracovního cyklu motoru

t_i je celkový čas kdy je motor v činnosti z pracovního cyklu motoru

$t_{1,2,3,\dots}$ jsou dílčí časy pracovního cyklu motoru, kdy je motor v činnosti

t_0 je celkový čas, kdy je motor v klidu z pracovního cyklu motoru

β_0 je činitel zhoršeného ochlazování pro stojící motor

β_i je činitel zhoršeného ochlazování motoru

$\beta_{1,2,3,\dots}$ jsou dílčí činitele zhoršeného ochlazování motoru

Výpočet činitele zhoršeného ochlazování motoru:

$$\beta_i = \left(\frac{M_{zti}}{M_N} \right)^2 \quad (3.22)$$

Kde: M_{zti} jsou zatěžovací momenty pro dané otáčky motoru, viz. obr.10.

M_N je nominální moment motoru

Činitel zhoršeného ochlazování je důležitý pro dimenzování motoru při cyklickém zatěžování což je náš případ.

Výpočet činitele zhoršeného ochlazování pro stojící motor:

$$\beta_0 = \left(\frac{M_{z\omega=0}}{M_N} \right)^2 \quad (3.23)$$

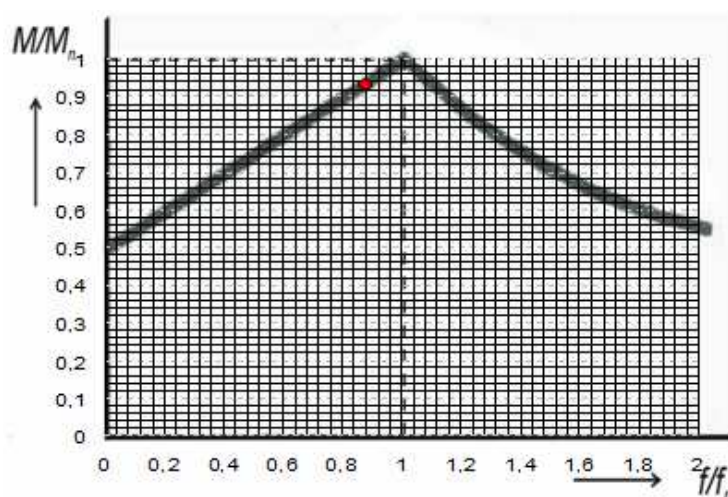
Kde: $M_{z\omega=0}$ je moment, jímž lze trvale zatížit stojící motor a dojde při tom právě k takovému oteplení motoru (izolace vinutí), jako při provozu motoru se jmenovitým momentem při jmenovitých otáčkách

V našem případě je $M_{z\omega=0} = 0 \text{ Nm}$ a tedy i $\beta_0 = 0$. Viz. (3.24)

Činitel zhoršeného ochlazování pro stojící motor:

$$\beta_0 = \left(\frac{M_{z\omega=0}}{M_N} \right)^2 = \left(\frac{0}{1} \right)^2 = 0 \quad (3.24)$$

Výpočet činitele zhoršeného ochlazování by měl vycházet z křivky zatížitelnosti pro konkrétní motor dodané výrobcem. V tomto případě jsem neměl tuto informaci, takže jsem na základě literatury [3] použil jednu z možných křivek zatížitelnosti motorů viz. obr.10.



Obr10. Křivka zatížitelnosti motorů. Vlastní úprava z [5].

Pokud bude motor trvale zatěžován přímo v bodech ležících na křivce momentové zatížitelnosti, dojde právě k takovému oteplení motoru, jako při provozu motoru se jmenovitým momentem při jmenovitých otáčkách. Tedy oteplení nepřekročí přípustnou mez [5].

Nyní je potřeba provést redukci nominálního momentu 6,8 Nm, který je pro otáčky 2960 ot/min a provoz S1, na moment pro otáčky 2527 ot/min. Takto redukovaným momentem je možné motor při těchto otáčkách trvale zatížit. Redukovaný moment musí být větší než vypočtený efektivní moment (3.28). K redukci nominálního momentu použijeme výše uvedenou křivku viz. obr.10. Nejprve určíme poměr žádaných a nominálních otáček motoru (3.25).

Poměr žádaných a nominálních otáček:

$$\frac{n_{Mot}}{n_n} = \frac{2527}{2960} \doteq \underline{\underline{0,85}} \quad (3.25)$$

Pomocí tohoto poměru odečteme z obr.10. koeficient, kterým se vynásobí nominální moment a tak získáme moment redukovaný. (Vyznačen červený bod).

Redukovaný moment DC motoru:

$$M_{RedMotDC} = 0,93 \cdot M_N = 0,93 \cdot 6,8 \doteq \underline{\underline{6,3 \text{ Nm}}} \quad (3.26)$$

Tímto momentem je možno motor trvale zatížit při pracovních otáčkách 2527 ot/min aniž by došlo k jeho přehřátí motoru. Dále je nutné stanovit činitele zhoršeného ochlazování a poté efektivní moment.

Výpočet činitele zhoršeného ochlazování:

$$\beta_i = \left(\frac{M_{zi}}{M_N} \right)^2 = \left(\frac{M_{RedMotDC}}{M_N} \right)^2 = \left(\frac{0,93 \cdot M_N}{M_N} \right)^2 = (0,93)^2 \doteq \underline{\underline{0,865}} \quad (3.27)$$

Efektivní moment DC motoru zohledňující oteplovací efekt.

$$M_e = \sqrt{\frac{\frac{M_1^2}{\beta_1} \cdot t_1 + \frac{M_2^2}{\beta_2} \cdot t_2 \dots}{\beta_0 \cdot t_0 + t_i}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9,2^2}{0,865} \cdot 10 + \frac{4,8^2}{0,865} \cdot 45 + \frac{(-0,6)^2}{0,865} \cdot 8 + \frac{7,9^2}{0,865} \cdot 10 + \frac{3,5^2}{0,865} \cdot 45 + \frac{(-1,8)^2}{0,865} \cdot 8 \right) \cdot 2}{0 \cdot (258 + 3 \cdot 30) + 252}} = \underline{\underline{5,4 \text{ Nm}}} \quad (3.28)$$

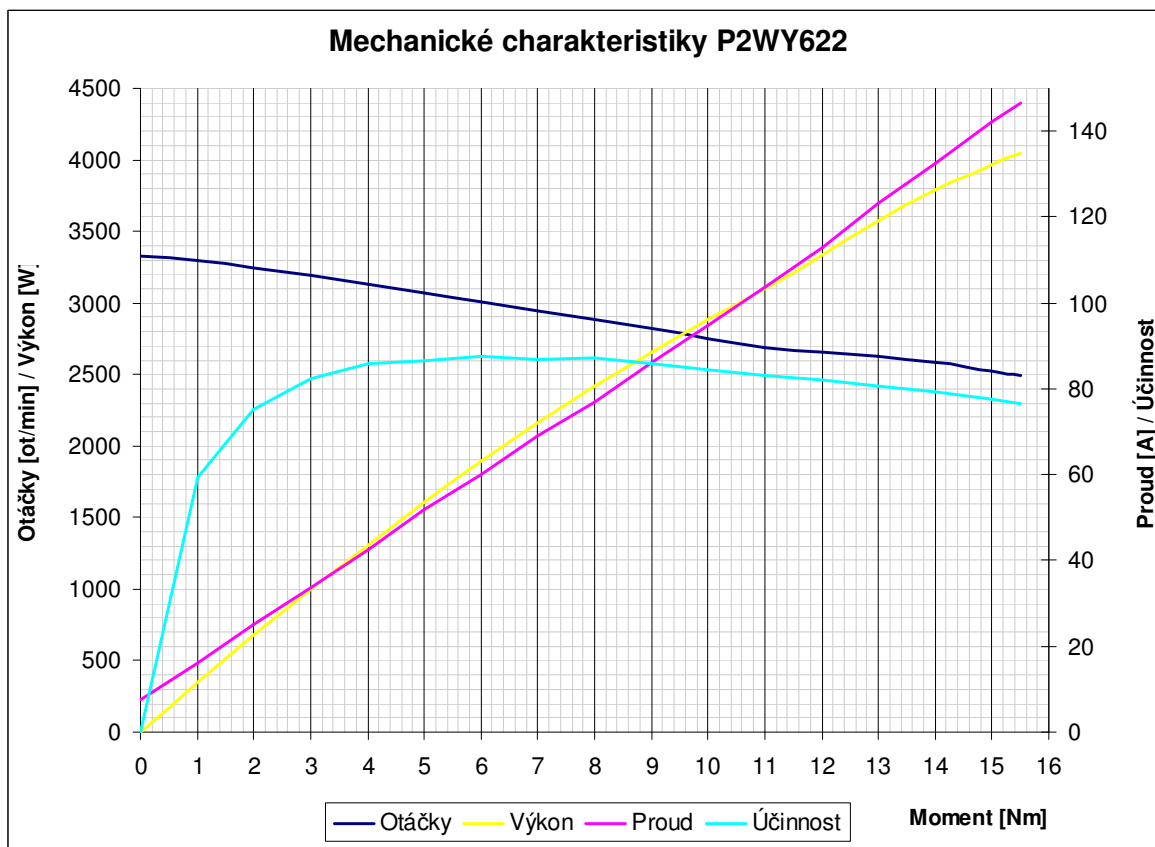
Výpočet efektivního momentu (3.28) potvrdil to, že motor vyhoví i z hlediska nominálních parametrů a je jej možné pro tento navržený pohon použít. Momentová rezerva efektivního momentu vůči redukovanému momentu, je cca 17%. Zajímavé je porovnání ekvivalentního (3.20) momentu a efektivního momentu, který je o cca 68 % větší.

3.6. Stanovení pracovního cyklu DC měniče

Obecně lze stanovení velikosti měniče definovat pro dva způsoby zatížení. Pro malá přetížení a odlehčení volíme měnič podle středního zatěžovacího proudu. Pro velká přetížení volíme velikost měniče podle efektivního zatěžovacího proudu. Jak již bylo zmíněno nebo pokud nestanoví výrobce měniče jinak, počítáme tento proud z nejvytíženější 5 minutové části pracovního cyklu.

V našem případě budeme měnič dimenzovat podle efektivního proudu. Podmínkou je, aby tento efektivní proud byl menší než nominální proud měniče. Pro informaci provedu výpočet i středního proudu. Samozřejmostí je, aby byl měnič schopen dodat i potřebný maximální proud.

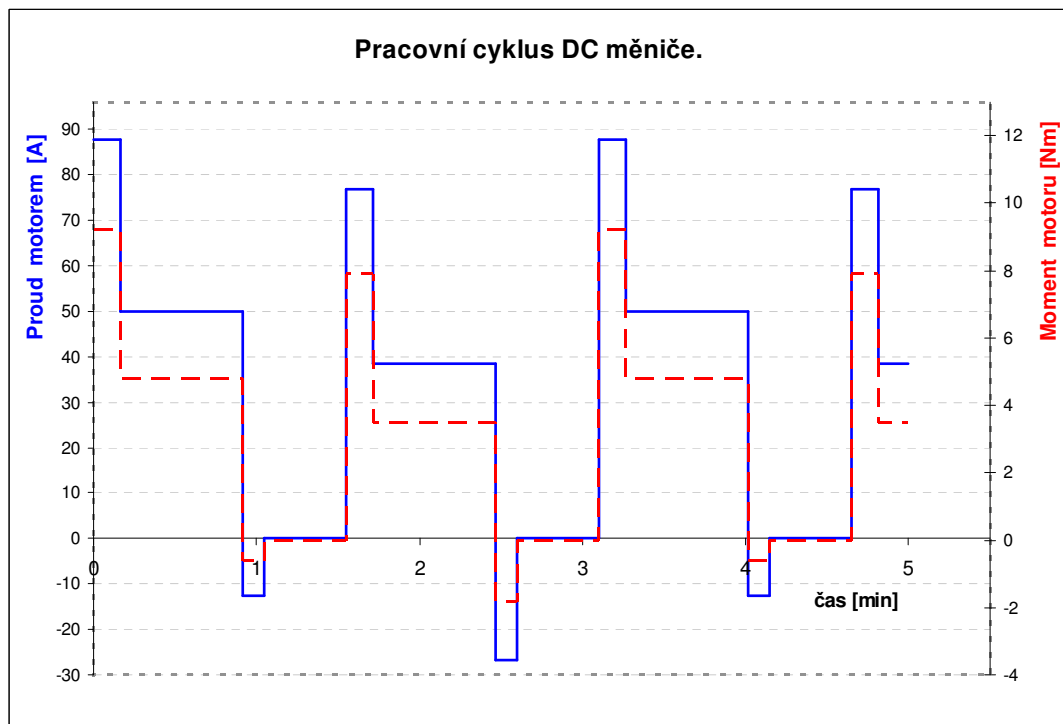
K vypočteným momentům pracovního cyklu motoru viz. tab.3. jsem přiřadil patřičné proudy motoru a tedy i měniče. Protože proud je přímo úměrný momentu podle vztahu $M = c\phi \cdot I_a$, kde M je moment motoru, I_a je proud motorem a $c\phi$ je součin konstrukční konstanty a magnetického toku motoru. Jednotlivé proudy jsem odečetl přímo z grafu mechanických charakteristik viz. obr.11.



Obr.11. Mechanické charakteristiky DC motoru P2WY622.

| Pracovní cyklus DC měniče - celkový čas 5 min. | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------|---------------------|-----------|--------------------|------------------|--------------------|-----------|
| Stav | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Brzdění do kopce | Přestávka | Rozjezd z kopce | Jízda z kopce | Brzdění z kopce | Přestávka |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 30 |
| proud [A] | 87,7 | 50 | -12,7 | 0 | 76,7 | 38,4 | -26,7 | 0 |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 11 | x | x |
| proud [A] | 87,7 | 50 | -12,7 | 0 | 76,7 | 38,4 | x | x |

Tab.4 Pracovního cyklu DC měniče.



Obr12. Pracovní cyklus DC měniče.

Ekvivalentní a střední hodnota proudu pracovního cyklu DC měniče:

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_{e1}^2 \cdot \Delta t_1 + I_{e2}^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + I_{em}^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}}$$

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{(87,7^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 45 + (-12,7)^2 \cdot 8) \cdot 2 + (76,7^2 \cdot 10) \cdot 2 + 38,4^2 \cdot 45 + (-26,7)^2 \cdot 8 + 38,4^2 \cdot 11}{300}} \doteq \underline{\underline{44,3 \text{ A}}} \quad (3.29)$$

$$I_{AV} = \frac{I_{e1} \cdot \Delta t_1 + I_{e2} \cdot \Delta t_2 + \dots + I_{em} \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}$$

$$I_{AV} = \frac{(87,7 \cdot 10 + 50 \cdot 45 + |-12,7| \cdot 8) \cdot 2 + 76,7 \cdot 10 \cdot 2 + 38,4 \cdot 45 + |-26,7| \cdot 8 + 38,4 \cdot 11}{300} \doteq \underline{\underline{34,6 \text{ A}}} \quad (3.30)$$

3.7. Volba typu DC měniče

Výběr měniče byl o něco jednodušší než výběr motoru. Jednak proto, že měnič bude řízen nadřazeným řídicím systémem, který může do jisté míry vylepšit nebo doplnit některé jednodušší, případně chybějící funkce pro řízení motoru. (Např.: regulace otáček motoru a tedy rychlosti

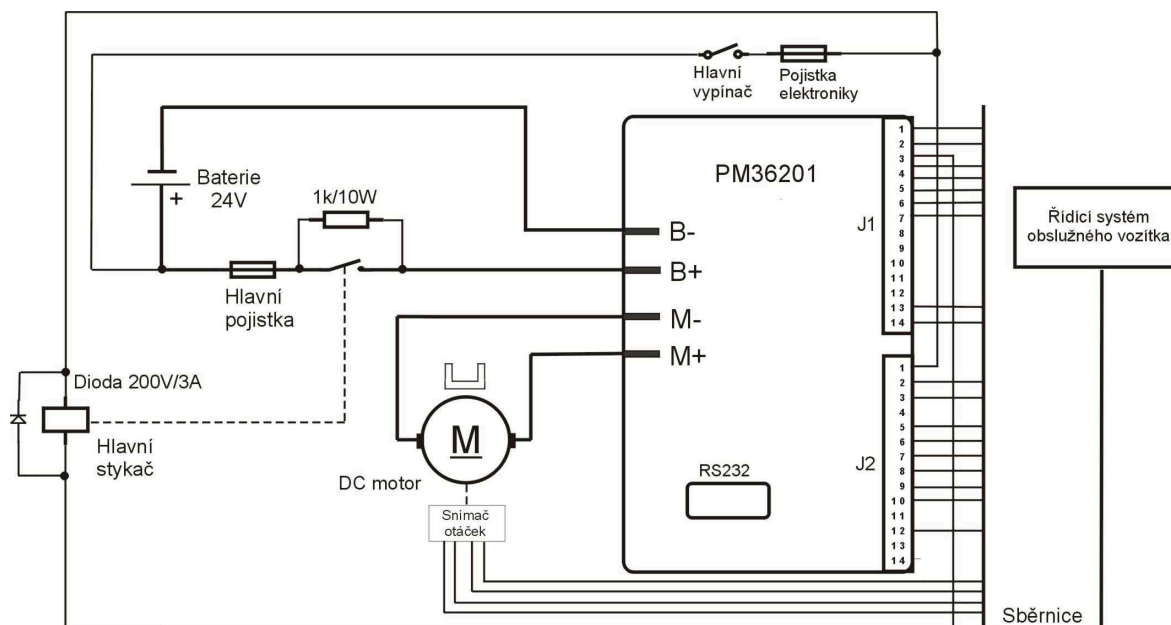
voztka nebo případné měření teploty motoru). A také z důvodu větší nabídky měničů na trhu např. viz. [16], [18] nebo [19]. Pro konečný výběr měla hlavní roli cena, do které se i nepřímo promítá fakt, že k nastavení parametrů měniče není potřeba kupovat žádný další interface ani software. Vybral jsem typ PM36201 od amerického dodavatele Kelly controller [12]. Ten je určen pro motory s permanentními magnety. V tab.5 jsou shrnuty katalogové a požadované proudy včetně procentuálního vyčíslení proudové rezervy.

| Katalogové parametry a požadované proudy DC měniče. | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-----------------|-----------------|--|--|-----------------------------------|--|
| Typ měniče | Nominální napájecí napětí baterie | Nominální proud | Maximální proud | Ekvivalentní (požadovaný) proud měniče | Rezerva měniče vzhledem k nominálnímu proudu | Požadovaný maximální proud měniče | Rezerva měniče vzhledem k maximálnímu proudu |
| PM36201 | 36 V | 80 A | 200 A 1 min | 43,3 A | 45% | 87,7 A | 56% |

Tab.5 Katalogové parametry a požadované proudy DC měniče.

Nastavení parametrů měniče, se provádí přes sériovou linku RS232 pomocí speciálního SW, který je na stránkách dodavatele dostupný zdarma [13].

3.8. Blokové zapojení DC pohonu



Obr.13 Zapojení DC pohonu.

Navržený měnič PM36201 je možné samostatně použít pro řízení motoru bez řídicího systému. Např. pro golfový vozík apod.. V těchto případech zastává řídicí systém člověk. Obslužné vozítko je ovšem vybaveno vlastním řídicím systémem, který zajišťuje ovládání měniče. Měnič samozřejmě disponuje mnoha možnými nastaveními. Přehled základních funkcí, parametrů a možných nastavení viz. tabulka P2 nebo manuál [11]. Popis funkcí jednotlivých pinů konektorů viz. tabulka P3.

4. Varianta s AC pohonem - návrh motoru a měniče

Postup návrhu motoru a měniče je v principu stejný jako u DC varianty. Při návrhu motoru se provede odhad motoru, stanovení převodového poměru, určení veličin během rozběhu a brzdění, výpočet jednotlivých momentů pro sestavení pracovního cyklu a nakonec kontrola motoru.

Pro návrh měniče se použije první pětiminutová část pracovního cyklu motoru, kde se k jednotlivým momentům přiřadí proudy. Z takto sestaveného pracovního cyklu měniče se vypočítá ekvivalentní proud. Nakonec se provede výběr měniče a načrtne blokové zapojení pohonu.

4.1. Volba typu AC motoru

Výběr AC motorů, jak jsem předpokládal z dřívější podobné zkušenosti, byl menší než u DC varianty. Nakonec jsem vybral motor italského výrobce Zapi, s typovým označením G1150400. Tato společnost má v ČR zastoupení prostřednictvím české firmy UHS JAKOS a.s., jejímž zaměřením jsou návrhy a řešení pohonů akumulátorové manipulační techniky, jako jsou např. vysokozdvizné vozíky.

Nominální parametry motoru se vztahovali k provozu S2 - 60 min respektive S3 – 70%. Z pracovního cyklu vozítka bylo téměř jisté, že z tohoto pohledu (typ provozu) motor vyhoví viz. tab.P4. Přesto jsem od dodavatele zjistil parametry motoru pro provoz S1. Integrovaný snímač teploty a především pak snímač otáček motoru je oproti DC variantě jistě výhodou. Tomu ovšem odpovídá i vyšší cena (viz. dále, kapitola 5). Parametry motoru jsou uvedeny v Tab.6.

| Parametry AC motoru G1150400. | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|--------|-------|-----------------|--------|--------|------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|------------|-------------------------------------|
| Výrobce | Provoz | Výkon | Proud | Maximální proud | Napětí | Moment | Maximální moment | Otáčky | Otáčky při max. momentu | Moment setrvačnosti | Účinnost | Poznámka |
| Best Motor s.r.l. | S1 | 1,3 kW | 65 A | viz.Tab.xy | 3x15 V | 6,9 Nm | viz.Tab.xy | 1800 ot/min | viz.Tab.xy | cca 0,004 kgm ² | viz.Tab.xy | Integrovaný snímač otáček a teploty |
| | S2 - 60 min S3 - 70% | 1,5 kW | 75 A | | | 8 Nm | | | | | | |

Tab.6 Parametry AC motoru G1150400.

4.2. Určení AC převodu

Ještě před samotným výpočtem pracovního cyklu motoru je potřeba stanovit, stejně jako u DC varianty, potřebný převodový poměr. Jeho výpočet provedeme opět na základě otáček zvoleného motoru. Zde si můžeme dovolit „posadit“ pracovní otáčky motoru nejen pod ale i nad nominální hodnotu otáček udávanou výrobcem. U těchto úvah je třeba počítat s tím, že při práci motoru do jmenovité rychlosti respektive v oblasti odbuzení musíme provést redukci nominálního momentu, jehož výsledná velikost závisí na konkrétních otáčkách. Pro redukci jsem použil stejnou křivku zatížitelnosti jako u DC motoru.

Parametry motoru udává výrobce pro napájecí frekvenci 65 Hz a otáčky 1800 ot/min. (Zřejmě proto že kolem této frekvence má motor největší účinnost). Ovšem z tab.P4 charakteristických hodnot motoru vyplývá, že největší momentové přetížení motoru bylo naměřeno při provozu motoru kolem frekvence 40 - 50 Hz.

S přihlédnutím k výpočtům u DC pohonu, ze kterého vyplynula potřeba spíše větší momentové rezervy, jsem zvolil pracovní otáčky motoru právě pro nižší napájecí frekvenci, konkrétně 1500 ot/min. Na základě prvního výpočtu viz níže tab. 10 jsem ponechal průměr kol stejný jako u DC varianty tedy 200 mm. Z těchto parametrů jsem vypočítal převodový poměr (4.1).

Převodový poměr pro AC pohon:

$$i_{pAC} = \frac{n \cdot l_o}{v \cdot 60} = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{v \cdot 60} = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{v \cdot 60} = \frac{1500 \cdot \pi \cdot 0,2}{5,56 \cdot 60} \doteq 4 \quad (4.1)$$

Ozubená kola pro převodovku vozítka byla vzhledem k většímu průměru hřídele AC motoru vybrána tak, že bylo použito místo ozubeného kola s 8 zuby kolo s 9 zuby, které má masivnější uchycení viz. [9]. Výsledný převod byl zvolen na $i_p = 4$ viz. Tab.7.

Také zde je dodržena podmínka, že průměr většího ozubeného kola je menší než průměr kol vozíku.

| Řetězová kola s nábojem 10B | | |
|----------------------------------|------------|-------------|
| Typ ozubeného kola | počet zubů | průměr [mm] |
| 10B-1-09-N | 9 | 52,6 |
| 10B-1-36-N | 36 | 189,1 |
| Výsledný převod $i_p = 36/9 = 4$ | | |

Tab.7 Ozubená kola pro řetězovou převodovku obslužného vozítka – AC varianta.

4.3. Určení veličin během rozběhu a brzdění - AC varianta

Určení veličin během rozběhu a brzdění se provede principiálně stejně jako u DC varianty.

Moment setrvačnosti od posuvných hmot vyskytujících se na straně PM:

$$J_{pAC} = m \cdot \left(\frac{D_{AC}}{2} \right)^2 = m \cdot \frac{D_{AC}^2}{4} = 300 \cdot \frac{0,2^2}{4} = \underline{\underline{3 \text{ kgm}^2}} \quad (4.2)$$

Moment setrvačnosti od posuvných hmot přepočtený na stranu hřídele motoru:

$$J_{pMotAC} = \frac{J_{pAC}}{i_{pAC}^2} = \frac{3}{4^2} = \underline{\underline{0,188 \text{ kgm}^2}} \quad (4.3)$$

Protože jsem nezískal od výrobce motoru moment setrvačnosti, provedl jsem jeho odhad na základě podobného motoru [14], [15], tedy $J_{MotAC} = 0,004 \text{ kgm}^2$.

Momenty setrvačnosti rotačních hmot vyskytujících se na straně motoru.

$$J_{RotMotAC} = \Sigma J \cong (0,1 \div 0,2) \cdot J_{MotAC} = 0,15 \cdot 0,004 = \underline{\underline{0,0006 \text{ kgm}^2}} \quad (4.4)$$

Doba rozjezdu a brzdění je stejné jako u DC pohonu.

Zrychlení motoru během rozjezdu:

$$\alpha_{rMotAC} = \frac{v}{t_r} \cdot \frac{2 \cdot i_{pAC}}{D_{AC}} = \frac{5,56}{10} \cdot \frac{2 \cdot 4}{0,2} \doteq \underline{\underline{22,24 \text{ rad/s}^2}} \quad (4.5)$$

Zpomalení motoru během brzdění:

$$\alpha_{bMotAC} = \frac{-v}{t_b} \cdot \frac{2 \cdot i_{pAC}}{D_{AC}} = \frac{-5,56}{8} \cdot \frac{2 \cdot 4}{0,2} \doteq \underline{\underline{-27,8 \text{ rad/s}^2}} \quad (4.6)$$

Moment potřebný k urychlení rotujících hmot na straně motoru (vlastní urychlovací moment):

$$M_{rMotAC} = (J_{MotAC} + J_{RotMotAC}) \cdot \alpha_{rMotAC} = (0,004 + 0,0006) \cdot 22,24 \doteq \underline{\underline{0,1 \text{ Nm}}} \quad (4.7)$$

Moment potřebný ke zpomalení rotujících hmot na straně motoru (vlastní zpomalovací moment):

$$M_{bMotAC} = (J_{MotAC} + J_{RotMotAC}) \cdot \alpha_{bMotAC} = (0,004 + 0,0006) \cdot -27,8 \doteq \underline{\underline{-0,13 \text{ Nm}}} \quad (4.8)$$

Moment potřebný k urychlení posuvných a rotačních hmot vyskytujících se na straně PM:

$$M_{prPMAC} = J_{pMotAC} \cdot \alpha_{rMotAC} \cdot i_{pAC} \cdot \vartheta = 0,188 \cdot 22,24 \cdot 4 \cdot 1,1 \doteq \underline{\underline{18,4 \text{ Nm}}} \quad (4.9)$$

Moment potřebný k brzdění posuvných a rotačních hmot vyskytujících se na straně PM:

$$M_{pbPMAC} = J_{pMotAC} \cdot \alpha_{bMotAC} \cdot i_{pAC} \cdot \vartheta = 0,188 \cdot -27,8 \cdot 4 \cdot 1,1 \doteq \underline{\underline{-23 \text{ Nm}}} \quad (4.10)$$

4.4. Stanovení pracovního cyklu AC motoru

Moment potřebný pro jízdu konstantní rychlostí do a z kopce na straně PM je stejný jako u DC pohonu tedy (4.11) a (4.12). (Kola obslužného vozítka pro DC a AC pohon mají stejný průměr).

$$M_{doPMAC} = M_{doPMDC} = \underline{\underline{21,5 \text{ N}}} \quad (4.11)$$

$$M_{zPMAC} = M_{zPMDC} = \underline{\underline{15,6 \text{ N}}} \quad (4.12)$$

Moment motoru potřebný při jízdě vozítka konstantní rychlostí z a do kopce:

$$M_{doMotAC} = F_{doCEL20} \cdot \frac{D_{AC}}{2} \cdot \frac{1}{i_{pAC} \cdot \eta_{CEL}} = 215 \cdot \frac{0,2}{2} \cdot \frac{1}{4 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{5,7 \text{ Nm}}} \quad (4.13)$$

$$M_{zMotAC} = F_{zCEL20} \cdot \frac{D_{AC}}{2} \cdot \frac{1}{i_{pAC} \cdot \eta_{CEL}} = 156 \cdot \frac{0,2}{2} \cdot \frac{1}{4 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{4,2 \text{ Nm}}} \quad (4.14)$$

Moment motoru potřebný k rozběhu při jízdě do a z kopce:

$$M_{rdoMotAC} = M_{rMotAC} + (M_{prPMAC} + M_{doPMAC}) \cdot \frac{1}{i_{pAC} \cdot \eta_{CEL}} = 0,1 + (18,4 + 21,5) \cdot \frac{1}{4 \cdot 0,941} = \underline{\underline{10,7 \text{ Nm}}} \quad (4.15)$$

$$M_{rzMotAC} = M_{rMotAC} + (M_{prPMAC} + M_{zPMAC}) \cdot \frac{1}{i_{pAC} \cdot \eta_{CEL}} = 0,1 + (18,4 + 15,6) \cdot \frac{1}{4 \cdot 0,941} \doteq \underline{\underline{9,2 \text{ Nm}}} \quad (4.16)$$

Moment na straně motoru potřebný k brzdění při jízdě do a z kopce:

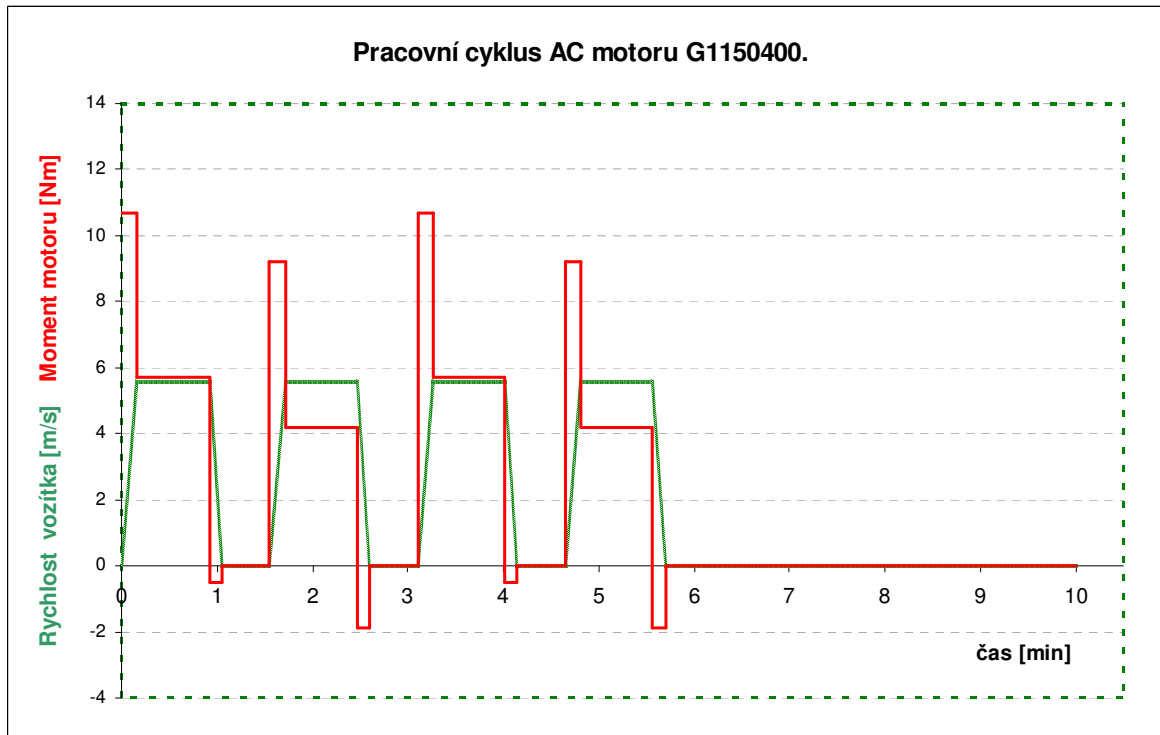
$$M_{bdoMotAC} = M_{bMotAC} + (M_{pbPMAC} + M_{doPMAC}) \cdot \frac{\eta_{CEL}}{i_{pAC}} = -0,13 + (-23 + 21,5) \cdot \frac{0,941}{4} \doteq \underline{\underline{-0,5 \text{ Nm}}} \quad (4.17)$$

$$M_{bzMotAC} = M_{bMotAC} + (M_{pbPMAC} + M_{zPMAC}) \cdot \frac{\eta_{CEL}}{i_{pAC}} = -0,13 + (-23 + 15,6) \cdot \frac{0,941}{4} \doteq \underline{\underline{-1,9 \text{ Nm}}} \quad (4.18)$$

Výsledný pracovní cyklus viz. tab. 8 a obr.14.

| Pracovní cyklus AC motoru G1150400 - celkový čas 10 min. | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------|---------------------|-----------|--------------------|------------------|--------------------|-----------|
| Stav | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Brzdění do kopce | Přestávka | Rozjezd z kopce | Jízda z kopce | Brzdění z kopce | Přestávka |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 30 |
| Moment [Nm] | 10,7 | 5,7 | -0,5 | 0 | 9,2 | 4,2 | -1,9 | 0 |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 258 |
| Moment [Nm] | 10,7 | 5,7 | -0,5 | 0 | 9,2 | 4,2 | -1,9 | 0 |

Tab.8 Pracovní cyklus AC motoru G1150400.



Obr.14 Pracovní cyklus AC motoru G1150400.

4.5. Kontrola navrženého AC motoru

Kontrola se provede v podstatě stejně jako u DC motoru. Nejprve provedu kontrolu maximální momentu včetně bezpečnostní rezervy. U AC varianty to platí dvojnásob, protože maximální moment motoru je přímo úměrný čtverci magnetického toku Ψ , tedy čtverci poměru U/f . Samozřejmě je potřeba aby tento maximální moment byl možný při požadovaných otáčkách cca 1500 ot/min.

Potom nominálního respektive efektivního momentu. Opět zde pro informaci uvedu výpočet ekvivalentního momentu. Obecný výpočet ekvivalentního momentu a efektivního jako u DC motoru. Také výpočet činitele zhoršeného ochlazování stojícího motoru je stejný, tedy nula.

Požadovaný maximální moment AC motoru s ohledem na bezpečnostní rezervu.

$$M_{\max Rez} = M_{rdoMotAC} + 30\% = M_{rdoMotAC} \cdot 1,3 = 10,7 \cdot 1,3 = \underline{\underline{13,9 \text{ Nm}}} \quad (4.19)$$

$$M_{MaxAC} > M_{maxRez} \rightarrow 17,4 \text{ Nm} > 13,9 \text{ Nm} \rightarrow \underline{\underline{OK}} \quad (4.20)$$

$M_{\max Re z}$ - moment kterým by měl být motor schopen poskytnout

M_{MaxAC} - maximální moment motoru při otáčkách 1520 ot/min

Z tab.P4 je vidět že motor dokáže tento moment poskytnout pro požadované otáčky. Motor tedy vyhoví i z hlediska momentové bezpečnosti. Práce motoru je v oblasti do jmenovitých otáček. Není tedy potřeba zohlednit pokles momentu zvratu v důsledku odbuzení motoru v oblasti nad jmenovitými otáčkami.

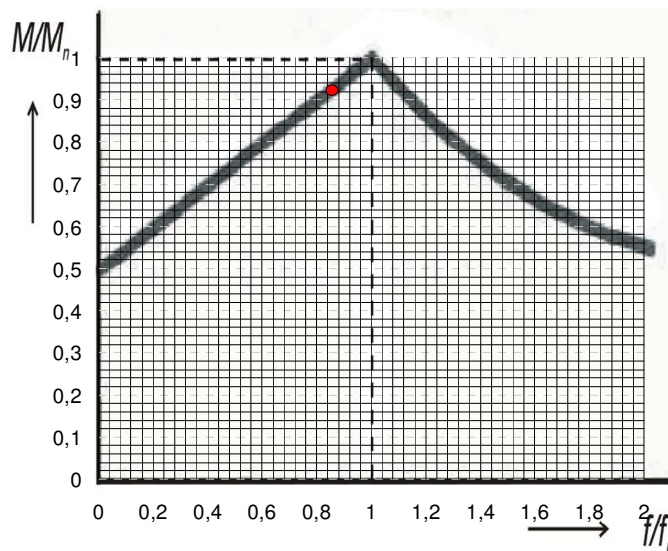
Ekvivalentní moment AC motoru:

$$M_{ekvAC} = \sqrt{\frac{(10,7^2 \cdot 10 + 5,7^2 \cdot 45 + (-0,5)^2 \cdot 8 + 9,2^2 \cdot 10 + 4,2^2 \cdot 45 + (-1,9)^2 \cdot 8) \cdot 2}{600}} \doteq \underline{\underline{3,8 \text{ Nm}}} \quad (4.21)$$

Také u AC motoru je nutné provést redukci nominálního momentu, protože motor pracuje s otáčkami 1500 ot/min a nominální otáčky jsou 1800 ot/min. První opět určíme poměr pracovních a nominálních otáček.

Poměr žádaných a nominálních otáček:

$$\frac{n_{Mot}}{n_n} = \frac{1500}{1800} \doteq \underline{\underline{0,83}} \quad (4.22)$$



Obr.9 Křivka zatížitelnosti motorů. Upraveno z [5].

Redukovaný moment AC motoru:

$$M_{RedMotAC} = 0,92 \cdot M_N = 0,94 \cdot 6,9 \doteq 6,5 \underline{\underline{Nm}} \Rightarrow \text{OK} \quad (4.23)$$

Opět platí stejná tvrzení jako u DC motoru. To znamená, že tímto momentem je možno motor trvale zatížit při pracovních otáčkách 1500 ot/min, aniž by došlo ke zkrácení životnosti vlivem překročení dovoleného oteplení izolace vinutí motoru.

Výpočet činitele zhoršeného ochlazování:

$$\beta_i = \left(\frac{M_{zti}}{M_N} \right)^2 = \left(\frac{M_{RedMotAC}}{M_N} \right)^2 = \left(\frac{0,94 \cdot M_N}{M_N} \right)^2 = (0,94)^2 \doteq \underline{\underline{0,884}} \quad (4.24)$$

Efektivní moment AC motoru zohledňující oteplovací efekt:

$$M_e = \sqrt{\frac{\frac{M_1^2}{\beta_1} \cdot t_1 + \frac{M_2^2}{\beta_2} \cdot t_2 \dots}{\beta_0 \cdot t_0 + t_i}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{10,7^2}{0,884} \cdot 10 + \frac{5,7^2}{0,884} \cdot 45 + \frac{(-0,5)^2}{0,884} \cdot 8 + \frac{9,2^2}{0,884} \cdot 10 + \frac{4,2^2}{0,884} \cdot 45 + \frac{(-1,9)^2}{0,884} \cdot 8 \right) \cdot 2}{0 \cdot (258 + 3 \cdot 30) + 252}} = \underline{\underline{6,2 Nm}} \quad (4.25)$$

Vypočtený redukovaný moment motoru 6,5 Nm je o cca 5 % větší než potřebný efektivní moment 6,2 Nm. Motor z tohoto hlediska vyhoví a navíc se dá říci, že motor je ideálně využitý.

Poznámka:

Na tomto místě uvádím příklad, který ukazuje, že návrh některých částí AC pohonu, jako je převodový poměr a průměr kol, nebyl hned napoprvé úspěšný. A to proto, že AC motor obecně nemá lineární charakteristiku závislosti otáček na momentu. Parametry jednoho z prvních neúspěšných návrhů viz. dále. Převodový poměre stejný jako u DC varianty tedy $i_p = 4,75$. Nominální otáčky motoru 1800 ot/min pro jízdu pracovní rychlostí. Pro tuto kombinaci bylo potřeba použít průměr kol 280 mm. Dílčí momenty pracovního cyklu motoru i výpočet ekvivalentního momentu byly v pořádku. Ovšem návrh „neprošel“ kontrolou momentové bezpečnosti. Požadovaný maximální moment motoru s bezpečnostní momentovou rezervou pro otáčky 1800 ot/min byl 15,5 Nm. Dle tab.P4 je motor schopen dodat moment jen 13,8 Nm pro otáčky 1820 ot/min. Shrnutí viz. níže tab.10. Z tohoto důvodu jsem se vrátil zpět na začátek návrhu AC pohonu a upravil parametry pohonu viz. výše výpočty AC pohonu.

| Pracovní cyklus AC motoru G1150400 pro $I_p = 4,5$ a $D_{AC} = 280$ mm. | | | | | | | | |
|---|---|----------------|------------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|-----------|
| Stav | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Brzdění do kopce | Přestávka | Rozjezd z kopce | Jízda z kopce | Brzdění z kopce | Přestávka |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 30 |
| Moment [Nm] | 11,9 | 6,6 | -0,1 | 0 | 9,9 | 4,8 | -1,7 | 0 |
| Ekvivalentní moment motoru [Nm] | $M_{ekvAC} \doteq \underline{\underline{4,3 \text{ Nm}}}$ | | | | | | Vyhovuje | |
| Požadovaná momentová rezerva [Nm] | $M_{\max Re z} = M_{rdoMotAC} \cdot 1,3 = 11,9 \cdot 1,3 = \underline{\underline{15,5 \text{ Nm}}}$ | | | | | | Nevyhovuje | |

Tab10. Ukázka jednoho z neúspěšných návrhů některých částí AC pohonu.

4.6. Stanovení pracovního cyklu AC měniče

Stanovení pracovního cyklu je v principu stejné jako u DC měniče. Ovšem komplikace byla v tom, že neexistuje graf pro odečtení potřebných proudů pro vypočtené momenty. K dispozici byla jen tabulka některých pracovních bodů viz. Tab.P1 a nominální parametry motoru viz. Tab.3.

4.6.1. Výpočet jednotlivých proudů AC měniče

Vstupními proudy motoru jsou vlastně výstupní proudy střídače Proud motoru si můžeme rozložit na podélnou, magnetizační složku I_d a příčnou složku I_q , která vytváří moment stroje. Podélní složka I_d tvoří velkou část proudu statoru při malých zátěžích. Příčná složka tvoří velkou část proudu statoru při velkých zátěžích.

Stanovení potřebných proudů jsem provedl výpočtem (4.26) podle [5]. Protože jsem neznal tokotvorný I_d ani momentotvorný proud I_q , pomocí dvou rovnic o dvou neznámých (4.27) jsem vypočetl „pomocné“ hodnoty I_q a I_d , které se vztahují ke známým hodnotám proudů I_1 a I_2 , momentů M_1 a M_2 , viz. Tab.P1 a frekvenci 60 Hz, při které motor poskytuje (přibližně) požadované otáčky. Hodnoty I_1 , I_2 , M_1 a M_2 byly voleny tak, aby se co nejvíce blížily momentům pracovního cyklu motoru. Tedy těm, které nás zajímají. Z toho usuzuji, že následující výpočty (4.28)-(4.31) jsou pro návrh AC měniče dostatečně přesné a tedy použitelné.

Výpočet potřebných hodnot proudů AC motoru:

$$I_{MP} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cdot \left(\frac{M_{PM}}{M_N} \right)^2 \quad (4.26)$$

Soustava dvou rovnic s vyjádřením dvou neznámých I_q a I_d :

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cdot \left(\frac{M_1}{M_N} \right)^2 & \Rightarrow & \quad I_d = \sqrt{I_1^2 - I_q^2} \cdot \left(\frac{M_1}{M_N} \right)^2 \\ I_2 &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cdot \left(\frac{M_2}{M_N} \right)^2 & \Rightarrow & \quad I_q = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_d^2}}{\left(\frac{M_2}{M_N} \right)^2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Hodnoty ze kterých se vypočítají potřebné proudy (vypsane z Tab.P4):

| Dva pracovní body AC motoru vypsane z tabulky Tab.P1. | | | | | |
|---|-------|--------|--------|---------|--------|
| f | I_1 | I_2 | M_1 | M_2 | M_N |
| 60,1 Hz | 53 A | 87,8 A | 4,9 Nm | 10,5 Nm | 6,9 Nm |

Tab.11 Pracovní body motoru G1150400, které jsou blízko jeho žádané pracovní oblasti.

Výpočet momentotvorného proudu I_q

$$I_q = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_d^2}}{\sqrt{\left(\frac{M_2}{M_N}\right)^2}} = \frac{\sqrt{I_2^2 - \left(I_1^2 - I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_N}\right)^2\right)}}{\sqrt{\left(\frac{M_2}{M_N}\right)^2}} \Rightarrow$$

$$I_q^2 \cdot \left(\frac{M_2}{M_N}\right)^2 - I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_N}\right)^2 = I_2^2 - I_1^2 \Rightarrow \quad (4.28)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_1^2}}{\sqrt{\left(\frac{M_2}{M_N}\right)^2 - \left(\frac{M_1}{M_N}\right)^2}} = \frac{\sqrt{87,8^2 - 53^2}}{\sqrt{\left(\frac{10,5}{6,3}\right)^2 - \left(\frac{4,9}{6,3}\right)^2}} = \underline{\underline{47,5 \text{ A}}}$$

Výpočet magnetizačního proudu I_d

$$I_d = \sqrt{I_1^2 - I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_N}\right)^2} = \sqrt{53^2 - 47,5^2 \cdot \left(\frac{4,9}{6,3}\right)^2} = \underline{\underline{38 \text{ A}}} \quad (4.29)$$

Ověření správnosti výpočtů proudů I_q a I_d

$$I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_N}\right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{4,9}{6,3}\right)^2} = \underline{\underline{53 \text{ A} \Rightarrow OK}} \quad (4.30)$$

Výpočtem (4.29), kde byly použité vypočtené proudy I_q a I_d a jeden z konkrétních pracovních bodů motoru, jsem ověřil správnost postupu. Nyní již můžu provést výpočty proudů pro jednotlivé pracovní momenty.

Velikost magnetizačního proudu 38 A bych předpokládal menší. Nicméně budeme ji respektovat podle výpočtu (4.31). Tato hodnota ovlivní i proudy pro malé momenty motoru.

V celém pracovním cyklu motoru se vyskytuje šest momentů, viz. tab.12, pro které je potřeba stanovit odpovídající proudy. Hodnoty momentů jsou: 10,7 Nm; 9,2 Nm; 5,7 Nm; 4,2 Nm; -1,9 Nm a -0,5 Nm. Pro tyto jsem vypočetl hodnoty proudů motoru I_{MotAC} , označených indexem požadovaného momentu.

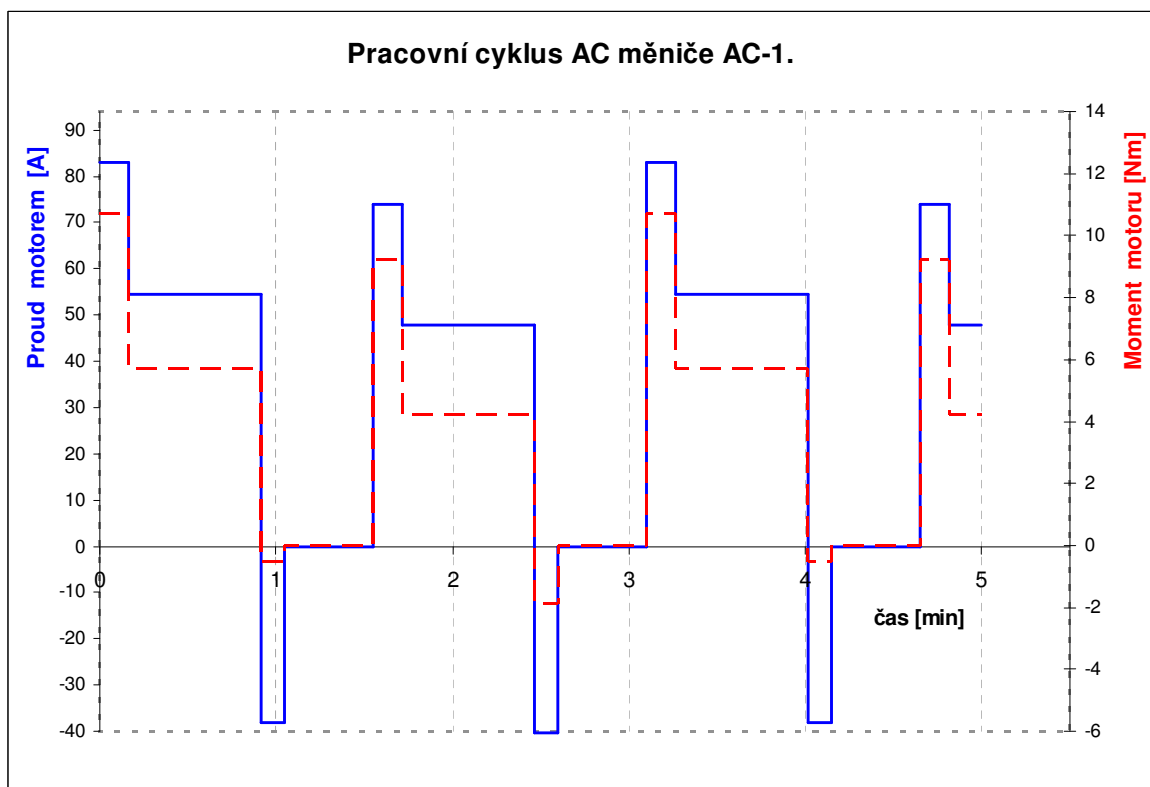
$$\begin{aligned}
 I_{MotAC10,7} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC10,3}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{10,7}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{82,9 \text{ A}}} \\
 I_{MotAC9,2} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC8,5}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{9,2}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{73,9 \text{ A}}} \\
 I_{MotAC5,7} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC5,7}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{5,7}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{54,6 \text{ A}}} \\
 I_{MotAC4,2} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC4,2}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{4,2}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{47,8 \text{ A}}} \\
 I_{MotAC-1,9} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC-1,4}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{-1,9}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{40,2 \text{ A}}} \\
 I_{MotAC-0,5} &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2 \cdot \left(\frac{M_{MotAC-1,4}}{M_N} \right)^2} = \sqrt{38^2 + 47,5^2 \cdot \left(\frac{-0,5}{6,9} \right)^2} \doteq \underline{\underline{38,2 \text{ A}}}
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

Jak jsem již zmínil, výpočet proudu pro moment 0,5 Nm bude zřejmě nejvíce nepřesný.

Ovšem budu s tímto proudem normálně počítat pro dimenzování měniče.

| Pracovní cyklus AC měniče - celkový čas 5 min. | | | | | | | | |
|--|------------------|----------------|------------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|-----------|
| Stav | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Brzdění do kopce | Přestávka | Rozjezd z kopce | Jízda z kopce | Brzdění z kopce | Přestávka |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 45 | 8 | 30 |
| proud [A] | 82,9 | 54,6 | -38,2 | 0 | 73,9 | 47,8 | -40,2 | 0 |
| čas [s] | 10 | 45 | 8 | 30 | 10 | 11 | x | x |
| proud [A] | 82,9 | 54,6 | -38,2 | 0 | 73,9 | 47,8 | x | x |

Tab.12 Pracovního cyklu AC měniče.



Obr.16 Pracovní cyklus AC měniče AC-1.

Graf pracovního cyklu AC měniče vypadá samozřejmě podobně jako DC měniče. Rozdíl je v hodnotách proudů motorem.

Princip stanovení velikosti AC měniče je stejný jako v případě stanovení velikosti DC měniče. Také je jasné, že měnič budeme dimenzovat podle efektivního proudu.

Výpočet efektivní hodnoty proudu pracovního cyklu DC měniče:

Obecný výpočet je stejný jako u DC měniče.

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{(82,9^2 \cdot 10 + 54,6^2 \cdot 45 + (-38,2)^2 \cdot 8) \cdot 2 + (73,9^2 \cdot 10) \cdot 2 + 47,8^2 \cdot 45 + (-40,2)^2 \cdot 8 + 47,8^2 \cdot 11}{300}} \doteq \underline{\underline{47,6 \text{ A}}} \quad (4.31)$$

4.7. Volba AC měniče

Z relativně velkého výběru měničů (oproti výběru motorů), viz. [18], [19], [21], [22], jsem na základě požadavků, ceny a dostupnosti vybral typ AC-1 od výrobce Zapi. Jedná se tedy o stejného dodavatele jako u AC motoru. Tento měnič také disponuje potřebným připojením pro snímač otáček i teploty, které jsou součástí výše navrženého AC motoru. Katalogové parametry a požadované proudy viz. tab.13.

| Katalogové parametry a požadované proudy AC měniče. | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-----------------|------------------|--|--|-----------------------------------|--|
| Typ měniče | Nominální napájecí napětí baterie | Nominální proud | Maximální proud | Ekvivalentní (požadovaný) proud měniče | Rezerva měniče vzhledem k nominálnímu proudu | Požadovaný maximální proud měniče | Rezerva měniče vzhledem k maximálnímu proudu |
| AC-1 | 24 V | 80 A | 250 A 1,5 min | 47,6 A | 40% | 82,9 A | 201% |

Tab.13 Katalogové parametry a požadované proudy AC měniče.

5.2. Rekuperace

Z pracovních cyklů DC a AC měniče obr.4 a 12., je vidět, že rekuperační brzdění přinese zanedbatelnou energii. Tohle zjištění jen potvrzuje zkušenost z předchozího podobného projektu. Nicméně oba typy měničů mohou pracovat ve všech čtyřech kvadrantech, tedy rekuperaci umožňují. Navíc při hledání měničů jsem v podstatě nenarazil na principiálně jiné měniče.

5.3. Komplikace při praktickém použití

Toto hodnocení je namísto především pro DC pohon. Zde je totiž nutné doplnit snímač otáček. Ten je potřeba dodatečně koupit nebo vyrobit. Vzhledem ke konstrukci DC motoru se technicky a zřejmě i cenově nabízí použití indukčního snímače s jednoduchým, na míru vyrobeným držákem, který by snímal otáčky motoru na lopatkách jeho ventilátoru. Samotné připojení může být provedeno jednoduše přes optočlen, který pravděpodobně bude standardní součástí řídicí elektroniky. Tím to ale nekončí. Navazující problém spočívá v tom, že řídicí elektronika musí zároveň fungovat jako regulátor otáček. Tedy další kus programu a technických prostředků navíc. Také přítomnost komutátoru může při nevhodném rozmístění jednotlivých komponentů (motoru, baterie, měniče, řídicí elektroniky, radiomodemu a kabeláže), znásobit problém s VF rušením, což minimálně způsobí zvýšenou spotřebu stíněných vodičů a odrušovacích prostředků.

5.4. Statické a dynamické momenty

Poměr statických a dynamických momentů potvrzuje teorii, že při dimenzování motorů pro pojezdové mechanismy není až tak nutné provádět kontrolu oteplení motoru, neboť z důvodů velkých dynamických momentů bývají motory předdimenzované [3]. V tabulce 14. jsou procentuálně vyčísleny rozdíly mezi momenty pro rozjezd a jízdu vozítka do a z kopce, a to pro obě varianty. Rozdíly mezi jednotlivými variantami jsou minimální a jsou způsobeny hlavně různými momenty setrvačnosti obou motorů.

| Porovnání dynamického a statického zatížení DC a AC motorů | | | | | |
|--|---|------------------|----------------|----------------|---------------|
| | | Rozjezd do kopce | Jízda do kopce | Rozjez z kopce | Jízda z kopce |
| DC pohon převodový poměr 4,75 | Moment [Nm] | 9,2 | 4,8 | 7,9 | 3,5 |
| | Poměrná velikost dynamického momentu oproti statickým | 92% | | 126% | |
| AC pohon převodový poměr 4 | Moment [Nm] | 10,7 | 5,7 | 9,2 | 4,2 |
| | Poměrná velikost dynamického momentu oproti statickým | 88% | | 119% | |

Tab.14 Porovnání dynamického a statického zatížení DC a AC motoru.

5.5. Účinnost

Z pohledu účinnosti jednotlivých pohonů bych vycházel z následující úvahy. Konkrétní účinnost měničů nemám k dispozici, takže ji zde neuvedu. Účinnost převodového a rozvodového ústrojí je také pro oba pohony stejná. Z uvedeného vyplývá, že ovlivnit celkovou účinnost mohou jen účinnosti motorů.

U motorů je jistě vhodné vycházet z konkrétní účinnosti při otáčkách a momentech, které motory dosahují při jízdě obslužného vozítka konstantní rychlostí. Výpočet účinnosti DC motoru vychází z následující úvahy. Účinnost se stanoví podílem výkonu a příkonu motoru. Výkon motoru se vypočítá z úhlové rychlosti a momentu motoru. Protože moment motoru pro jízdu do kopce a z kopce je jiný, budu počítat s jejich aritmetickým průměrem. Příkon pak z napětí a proudu motoru. Proud motorů, podobně jako momenty (jízda z a do kopce), stanovím aritmetickým průměrem. Přesné napětí na motoru je nutné vypočítat. Pro stanovení účinnosti AC motoru si dovoluji určité zjednodušení. Z tabulky P4 vyberu dva pracovní body, které jsou nejbližší pracovním otáčkám a zatížení motoru a z nich opět aritmetickým průměrem stanovím výslednou účinnost.

Úhlová rychlost motoru při nominálním zatížení motoru:

$$\omega_{nMotDC} = \frac{n_{nMotDC} \cdot \pi}{30} = \frac{2960 \cdot \pi}{30} = \underline{\underline{309,97 \text{ rad/s}}} \quad (5.1)$$

Kde: n_{nMotDC} jsou nominální otáčky motoru

Odpor kotvy:

$$R_a = (1 - \eta_{nMotDC}) \cdot \frac{U_{nMotDC}}{I_{nMotDC}} = (1 - 0,87) \cdot \frac{36}{67} = \underline{\underline{0,0699 \Omega}} \quad (5.2)$$

Kde: R_a je odpor vinutí kotvy DC rotoru

I_{nMotDC} je nominální proud DC motoru

U_{nMotDC} je nominální napětí DC motoru

Konstanta motoru:

$$C\phi_n = \frac{U_a - R_a \cdot I_{nMotDC}}{\omega_{nMotDC}} = \frac{36 - 0,0699 \cdot 67}{309,97} = \underline{\underline{0,101 Vs}} \quad (5.3)$$

Úhlová rychlost motoru při jízdě vozítka rychlostí 20 km/hod:

$$\omega_{20MotDC} = \frac{n_{20MotDC} \cdot \pi}{30} = \frac{2527 \cdot \pi}{30} = \underline{\underline{264,63 \text{ rad/s}}} \quad (5.4)$$

Výpočet průměrného momentu DC motoru při jízdě 20 km/hod:

$$M_{20MotDC} = \frac{M_{doMotDC} + M_{zMotDC}}{2} = \frac{4,8 + 3,5}{2} = \underline{\underline{4,15 \text{ Nm}}} \quad (5.6)$$

Napětí na motoru při jízdě vozítka rychlostí 20 km/hod:

$$U_{20} = C\phi_n \cdot \omega_{20MotDC} + \frac{R_a \cdot M_{20MotDC}}{C\phi_n} = 0,101 \cdot 264,63 + \frac{0,0699 \cdot 4,15}{0,101} = \underline{\underline{29,6V}} \quad (5.5)$$

Výpočet průměrného proudu DC motoru při jízdě vozítka rychlostí 20 km/hod:

$$I_{20MotDC} = \frac{I_{doMotDC} + I_{zMotDC}}{2} = \frac{50 + 38,4}{2} = \underline{\underline{44,2 A}} \quad (5.7)$$

Kde: $I_{doMotDC}$ je proud motoru při jízdě vozítka do kopce rychlostí 20 km/hod, viz. tab.3.

I_{zMotDC} je proud motoru při jízdě vozítka z kopce rychlostí 20 km/hod, viz. tab.3.

Výpočet účinnosti DC motoru při jízdě 20 km/hod:

$$\eta_{20MotDC} = \frac{\omega_{20MotDC} \cdot M_{20MotDC}}{U_{20MotDC} \cdot I_{20MotDC}} = \frac{264,63 \cdot 4,15}{29,6 \cdot 44,2} = \underline{\underline{0,84}} \quad (5.8)$$

Výpočet účinnosti AC motoru při jízdě 20 km/hod:

$$\eta_{20MotAC} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} = \frac{75,6 + 86,5}{2} \doteq 81\% \rightarrow \underline{\underline{0,81}} \quad (5.9)$$

Kde: η_1 je účinnost motoru zatíženého momentem 5 Nm a řídicí frekvencí 50,2 Hz

η_2 je účinnost motoru zatíženého momentem 4,9 Nm a řídicí frekvencí 60,1 Hz

Účinnosti η_1 a η_2 AC motoru byly odečtena z tabulky P4.

Z vypočtených účinností je vidět že DC varianta na tom bude z energetického hlediska o trochu (ale nikterak zásadně), lépe. Navíc tyto vypočtené účinnosti obou motorů je nutno brát spíše jako orientační. Např. u AC varianty jsem účinnost motoru vypočítal na základě zjednodušené aproximace dvou „sousedních“ účinností. Také záleží na dalších okolnostech jako např. okolní teplota nebo fakt že konstanta DC motoru není stejná v celém rozsahu otáček a zatížení motoru.

5.6. Využití pohonu

Využití vozítka je z mého pohledu relativně malé. Ze zadání vyplývá, že vozítko bude používáno 3 týdny v měsíci, 3 dny v týdnu, 16x za den ujede 300 metrovou dráhu tam a zpět. Čas, za který urazí dráhu tam a zpět je 126 vteřin.

Výpočet počtu hodin za rok kdy motor pracuje:

$$t_{rok} = \frac{\text{délka cyklu} \cdot \text{počet cyklů za den} \cdot \text{počet dnů v týdnu} \cdot \text{počet týdnů v měsíci} \cdot \text{počet měsíců v roce}}{3600} \dots [\text{hod}] \quad (5.10)$$
$$t_{rok} = \frac{126 \cdot 16 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 12}{3600} \doteq \underline{\underline{60,5 \text{ hod}}}$$

Když si představím např. vysoko zdvižný vozík, který je používán ve třísměnném provozu, cca 200 dní v roce, je celkový roční čas provozu obslužného vozítka 60,5 hod velmi malý. Vzhledem k faktu, že výrobce zařízení musí dodržet záruku na bezporuchový provoz 2 roky, konkrétně v našem případě se v podstatě jedná o 121 hodin pro provoz, nepřináší AC varianta žádnou výhodu.

5.7. Cena

Při rozhodování pro použití konkrétního motoru či měniče jsem měl k dispozici vždy cenu těchto komponentů potvrzenou dodavatelem. Jednak proto, že cena pohonu je dosti podstatná při tomto návrhu (ale vlastně i obecně ve většině případů) a také proto, že tento návrh pohonu je pro konkrétní skutečnou aplikaci. Dodávku komponentů lze zajistit, zjednodušeně řečeno, přímo jejich objednávkou. (Tedy se „zárukou“ ceny a dostupnosti).

Přehled cen komponentů DC a AC pohonu uvádím v tabulce 15. Některé ceny, jako například snímač otáček, jsem odhadl na základě mé technické praxe. Tabulka také neobsahuje cenu, o kterou se navýší DC varianta pohonu při implementaci softwarového regulátoru otáček do nadřazené řídicí elektroniky.

| Přibližné ceny jednotlivých komponentů AC a DC pohonu. | | | | |
|--|--|---------------|-------------|----------------------|
| Ceny jsou bez DPH | DC varianta | | AC varianta | |
| | Motor | Měnič | Motor | Měnič |
| Typ | P2ZZ544 | PM36201 | G1150400 | AC-1 |
| Cena při odběru 1ks | 14 500 Kč | 5000 Kč | 17 000 Kč | 10 750 Kč |
| Cena při odběru cca 30 ks | 11 000 Kč | cca 4500 Kč | 15 500 | 10 000 Kč |
| Další náklady při odběru 1 ks | Snímač otáček | Doprava z USA | x | Programovací konzole |
| | cca 1 000 Kč | cca 1 000 Kč | x | 8 500 Kč |
| Cena 1 pohonu celkem, při odběru 1ks | 21 500 Kč | | 36 250 Kč | |
| Cena 1 pohonu celkem, při odběru cca 30 ks. | cca 17 000 Kč (počítáno s odhadem ceny -25% pro dopravu i snímač otáček) | | 25 800 Kč | |

Tab.15 Přibližné ceny navržených komponentů pohonu + dodatečné náklady.

5.8. Výhody a nevýhody

Jednotlivé výhody a nevýhody byli v podstatě uvedeny v textu předchozích kapitol. Zde jsem je jen shrnul pomocí tabulky 16.

| Výhody a nevýhody DC a AC pohonu | | | |
|---|-------------------------------------|--|---|
| DC pohon | | AC pohon | |
| Výhody | Nevýhody | Výhody | Nevýhody |
| nižší cena | komutátor - udržba, menší životnost | jeden dodavatel motoru a měniče | o 68% vyšší cena při odběru 1kusu |
| český výrobce motoru | potřeba doplnění snímače otáček | integrovaný snímač otáček a teploty motoru | o 51% vyšší cena při odběru 30kusu |
| pro nastavení měniče žádné další výdaje navíc | Měnič z USA | motor bez komutátoru | speciální hardware pro nastavení měniče |

Tab.16 Shrnutí hlavních výhod a nevýhod DC a AC pohonu.

5.9. Shrnutí

Obě varianty pohonu jsou bez problémů v praxi použitelné. Jak bylo zmíněno v úvodu, obslužné vozítko je určeno pro práci v prostoru s velikou pravděpodobností možného (i rozsáhlého) poškození. Proto z hlediska použití toho či onoho pohonu hraje velkou roli cena. A vezmu-li v úvahu využití vozítka, 60,5 hodin za rok, zvolil bych i přes jeho veškeré nedostatky DC pohon.

Závěr

Cílem této práce byl návrh nového pohonu pro obslužné vozítko, jehož plány jsou zatím jen „na papíře“. Jednotlivé úkoly při tomto návrhu, jako je koncepce pohonu, stanovení jízdních odporů vozítka, návrh stejnosměrné a střídavé varianty pohonu a zhodnocení obou variant, se dle mého názoru podařily úspěšně splnit.

V první části práce jsem provedl analýzu vstupních parametrů a technických dat. Na tomto základě jsem vybral metodu návrhu pohonu, která principiálně vychází z navrhování pohonů pro pojezdové mechanismy jeřábů a mobilních pracovních strojů. Také jsem zkonstruoval pracovní cyklus pro prvních 30 minut jízdy vozítka, přesněji řečeno závislost rychlosti pohybu vozítka na čase viz. obr.2., který později posloužil jako základ pro stanovení pracovního cyklu pohonu.

V podstatě všechny výpočty jednotlivých jízdních odporů (valivého, třecího, vzdušného a odporu stoupání), jsem provedl s jistým zjednodušením. To spočívalo v použití tabulkových (normovaných) konstant např. pro tření ve válečkovém ložisku, tření bočního vedení kola, součinitele odvalovacího odporu nebo v odhadu součinitele vzdušného odporu. Pro běžnou praxi a navíc při relativně malých výkonech pohonu a nízkých rychlostech obslužného vozítka, jsou tyto výpočty jízdních odporů, myslím dostatečně přesné. Z celkové síly pro překonání jízdních odporů (kromě odporu zrychlení), jsem určil statický výkon motoru. Ten je zapotřebí pro jízdu vozítka konstantní rychlostí, tedy po rozjezdu vozítka. Také jsem provedl kontrolu adheze kola pro nejhorší situaci, tedy brzdění obslužného vozítka z kopce.

Jistá výhoda při volbě motoru plynula z možnosti volby převodového poměru a průměru kol v určitém rozsahu. Takže ještě před samotným návrhem pohonu jsem ve druhé kapitole vypočítal teoreticky možný rozsah pracovních otáček motoru.

Ve třetí a čtvrté kapitole jsem provedl návrh pohonu pro DC a AC variantu. Pro obě varianty je návrh v podstatě stejný. Na základě statického výkonu a možných pracovních otáček jsem vybral konkrétní motor. Následně jsem s přihlédnutím k mechanickým charakteristikám motoru, zvolil průměr kol a určil konkrétní převodový poměr. Dále jsem určil momenty setrvačnosti posuvných a rotačních částí a vlastní urychlovací moment motoru pro výpočet dynamických momentů potřebných pro rozjezd a brzdění vozítka. Z nich jsem sestavil pracovní cyklus motoru. Ten, podle metody ekvivalentního respektive efektivního proudu, posloužil pro kontrolu zvoleného motoru, který lépe zohledňuje zatížení motoru při práci na jiných než nominálních otáčkách. V našem případě u obou variant byly zvolené otáčky motoru nižší než

nominální. Dále jsem provedl kontrolu maximálního momentu motoru z hlediska 30% tzv. bezpečnostní momentové rezervy. U obou variant jsem provedl několik návrhů, než jsem našel vhodnou kombinaci volby převodu a průměru kol. Problém byl hlavně s bezpečnostní momentovou rezervou. Před volbou měniče jsem musel určit proudy motorem pro jednotlivé části pracovního cyklu, který je dle normy 5 minutový interval pracovního cyklu motoru s největším zatížením. U DC motoru jsem odečetl proudy přímo z mechanických charakteristik motoru. Ovšem u AC varianty jsem musel jednotlivé proudy vypočítat. Výpočet navíc komplikoval fakt, že jsem neznal proud motorem na prázdno, tedy magnetizační proud. Jeho hodnotu jsem stanovil ze dvou známých pracovních bodů pomocí dvou rovnic o dvou neznámých. Následný výpočet efektivní proudu byl základem pro výběr velikosti měniče. Při volbě měniče jsem samozřejmě bral v úvahu i maximální proud vyskytující se v pracovním cyklu. Součástí návrhů jsou i zapojení (částečně bloková) obou variant pohonů. V příloze poté i možností nastavení měničů.

V poslední kapitole jsem provedl zhodnocení obou variant z následujících hledisek: dostupnost navržených komponentů, výhod a nevýhod jednotlivých variant dále z hlediska využití rekuperace, porovnání statických a dynamických momentů motorů, účinnosti a ceny.

Při hledání vhodných komponentů pro pohon obslužného vozítka jsem narazil na několik zajímavých výrobců motorů i měničů [18-23]. Např. společnost Iskra nabízí relativně velký výběr DC trakčních motorů. Za zmínku jistě stojí také komutátorové i elektronicky komutované DC motory firmy Heinzmann, které jsou zřejmě vhodné pro náročnější aplikace. Ovšem pro toto obslužné vozítko, jenž dle zadání bude v provozu cca 60,5 hodin za rok a je určeno pro práci v prostoru s velkou pravděpodobností možného poškození bych rozhodně volil levnější variantu pohonu. I přes všechny nevýhody, které by mohly cenu pohonu ještě zvýšit, bych volil DC pohon. Tedy motor s permanentními magnety českého výrobce Atas [10] a měnič od amerického dodavatele Kelys Controller [12], za cca 20 tis Kč, který je oproti AC variantě levnější o cca 60%.

Z pohledu možného vylepšení koncepce pohonu obslužného vozítka a to především v případě většího obchodního úspěchu, navrhuji vyvinout vlastní konstrukci DC měniče. Ten by mohl poskytnout jen nezbytně nutné funkce pro tuto aplikaci. Koncepce měniče by mohla být dvojitá. Za prvé návrh pouze koncového stupně, kde hlavní řídicí systém vozítka bude mimo jiné plnit i celkové řízení pohonu nebo návrh plnohodnotného měniče, tedy s vlastní samostatnou řídicí logikou. Z tohoto pohledu se může „odlehčit“ současné variantě, kdy řídicí systém již částečně vypomáhá DC měniči s regulací rychlosti vozítka. Další vylepšení tohoto konkrétního projektu mě nenapadá.

Literatura

- [1] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*. Brno 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [2] NEBORÁK, I. – SLÁDEČEK, V.: *Elektrické pohony, pro kombinované a distanční studium*. VŠB - TU Ostrava, 2008
- [3] VRÁNA, V.: *Dimenzování pohonů u vybraných pracovních mechanismů*. VŠB - TU Ostrava, 1999
- [4] ,Katedra elektroniky, NEP: *Jízdní odpory vozidla – studijní opora*. VŠB-TU Ostrava.
- [5] ,Katedra elektroniky, NEP: *Dimenzování AM – studijní opora*. VŠB-TU Ostrava.
- [6] www.converter.cz: **Tabulky**. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://www.converter.cz/tabulky/valive-treni.htm>
- [7] www.autolexicon.net: *Aerodynamika*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://cs.autolexicon.net/articles/aerodynamika/>
- [8] www.mitcalc.com: *Tabulky a dokumenty*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://www.mitcalc.com/doc/help/cz/index.htm>
- [9] Elektromotory - převodovky s.r.o.: *Řetězová kola s nábojem 10B*. [online].
[cit. 2010-02-10]. Dostupné z: <http://www.prevodovky-elektromotory.cz/10b-1.html>
- [10] ATAS elektromotory Náchod a.s.: *Komutátorové motory s permanentními magnety* [online]. [cit. 2010-02-10]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/files/P2X.pdf>
- [11] Kelly Controls, LLC.: *Support* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://www.kellycontroller.com/support.php>
- [12] Kelly Controls, LLC.: *PM36201* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://kellycontroller.com/pm36201200a36vwith-regen-p-543.html>
- [13] Kelly Controls, LLC.: *Online Demo / Help*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://kellycontroller.com/PMhelp.php>
- [14] BESI ELEKTRO s.r.o.: *Katalog asynchronních motorů AOM*. [online]. [cit. 2012-05-01].
Dostupné z: http://www.besielektro.cz/ceniky/aom_k13.pdf
- [15] HEIDENREICH Loštice: *Katalog asynchronních motorů Siemens*. [online]. [cit. 2012-05-01].
Dostupné z: <http://www.elektromotory.com/katalogy/1LA7.pdf>

- [16] UHS JAKOS a.s.: *Elektronické regulátory otáček Zapi* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.zapiservice.cz/index.htm>
- [17] Zapi Inc.: *ZAPI AC-1 technical specification and manual* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.zapiinc.com/products/24/ac-1>
- [18] HEINZMANN GmbH & Co. KG: *Electric & Hybrid Drives*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.heinzmann.com/en/electric-and-hybrid-drives>
- [19] FSIP: *NEW 2012 Product Overview*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://www.fsip.biz/Documents/GolfPO_web2012.pdf
- [20] BEST MOTOR s.r.l.: *Traction motors DC*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://www.bestmotor.it/frameset_ei.html
- [21] Zapi S.p.A. *Produktkatalog*. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://www.atech-antriebstechnik.de/pdf/atech_zapi_gesamt_dt.pdf
- [22] GLOBAL INDUSTRIAL PRODUCTS, INC.: *AC Motor Controllers* [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné z: <http://www.globalepower.com/AC-MotorControllers.htm>
- [23] AGV: *Elektromotory* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.iskra-agv.cz/elektromotory.htm>

Seznam příloh

Tabulky

| | |
|---|---|
| <i>Tab.P1</i> Pracovní body DC motoru P2WY622. | 1 |
| <i>Tab.P2</i> Základní technická data DC měniče PM36201. | 2 |
| <i>Tab.P3</i> Popis funkce jednotlivých pinů konektorů DC měniče PM36201. | 3 |
| <i>Tab.P4</i> Pracovní body AC G1150400. | 4 |
| <i>Tab.P5</i> Základní technická data AC měniče AC-1. | 5 |
| <i>Tab.P6</i> Popis funkce jednotlivých pinů konektorů AC měniče AC-1. | 6 |

Obrázky

| | |
|---------------------------------|---|
| <i>Obr.P1</i> DC měnič PM36201. | 1 |
| <i>Obr.P2</i> AC měnič AC-1. | 4 |

Přílohy

| M [Nm] | U [1/min] | I [A] | P1 [W] | P2 [W] | η [%] |
|--------|-----------|-------|--------|--------|------------|
| 0 | 3330 | 7,5 | 270 | 0 | 0 |
| 1 | 3300 | 16,2 | 583 | 346 | 59,3 |
| 2 | 3248 | 25,2 | 907 | 680 | 75 |
| 3 | 3192 | 33,8 | 1217 | 1003 | 82,4 |
| 4 | 3130 | 42,5 | 1530 | 1311 | 85,7 |
| 5 | 3071 | 51,7 | 1861 | 1608 | 86,4 |
| 6 | 3010 | 60 | 2160 | 1891 | 87,6 |
| 7 | 2949 | 69 | 2484 | 2162 | 87 |
| 8 | 2886 | 77 | 2772 | 2418 | 87,2 |
| 9 | 2821 | 86,2 | 3103 | 2659 | 85,7 |
| 10 | 2752 | 94,6 | 3405 | 2882 | 84,6 |
| 11 | 2692 | 103,6 | 3730 | 3101 | 83,1 |
| 12 | 2654 | 112,8 | 4061 | 3335 | 82,1 |
| 13 | 2625 | 123,2 | 4435 | 3574 | 80,6 |
| 14 | 2584 | 132,6 | 4774 | 3788 | 79,4 |
| 15 | 2527 | 142 | 5112 | 3969 | 77,6 |
| 15,5 | 2491 | 146,5 | 5274 | 4043 | 76,7 |

Tab.P1 Pracovní body DC motoru P2WY622.



Obr.P1 DC měnič PM36201.

| Základní technická data DC měniče PM36201. | |
|--|---|
| Rekuperační brzdění. | |
| Napětí | 18-90 V |
| Nominální proud | 80 A trvale |
| Max. proud | 250 A/ 2,5 min |
| Zesilovač | 10% z maximálního proudu na několik vteřin |
| Frekvence | 16,6 kHz |
| Pracovní teplota | -30° ... +50° , při 100°C dojde k automatickému vypnutí |
| Vlastní spotřeba | 150 mA |
| Typ motoru | stejnosměrný s permanentními magnety |
| Další technické vlastnosti: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ řízení mikroprocesorem ▪ nízký úbytek napětí na výkonových tranzistorech MOSFET ▪ Nízké EMC ▪ datová sběrnice CAN ▪ řízení mikroprocesorem ▪ programovatelný přes RS232 pomocí PC, SW zdarma ▪ informační signály provozu (OK stav a porucha) ▪ ochrana proti nízké teplotě i přehřátí, vybití baterie, ▪ možnost připojení reproduktoru pro akustickou signalizaci reverzace ▪ zdroj 5V / 40mA pro napájení externích zařízení (snímače apod.) | |
| Přehled základních nastavení: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ maximální proud motorem ▪ možnost nastavení rozjezdové, dojezdové a rekuperační rampy ▪ tři režimy rekuperace – spínač brzdy, uvolnění akcelérátoru, analogové ovládání ▪ nastavení ramp brzdění a rozjezdu při skokové změně směru jízdy ▪ brzdící intenzita při aktivaci redukce rychlosti | |

Tab.P2 Základní technická data DC měniče PM36201.

| Popis funkce jednotlivých pinů konektorů DC měniče PM36201. | |
|---|---|
| Pin č. | Konektor J1 |
| 1 | zvuková signalizace při reverzaci |
| 2 | Informace o proudu |
| 3 | hlavní stykač |
| 4 | zvuková signalizace při reverzaci |
| 5 | GND |
| 6 | indikace provozu |
| 7 | GND |
| 8 | RS232 Rx |
| 9 | RS232 Tx |
| 10 | CAN bus H |
| 11 | CAN bus L |
| 12 | nezapojen |
| 13 | GND |
| 14 | chybové hlášení |
| | Konektor J2 |
| 1 | napájení měniče - baterie |
| 2 | GND |
| 3 | GND |
| 4 | vstup pro termistor |
| 5 | proporcionální řízení rychlosti |
| 6 | proporcionální řízení brzdění |
| 7 | zdroj 5V / 40 mA |
| 8 | motor se roztočí na nastavené maximum, za nastavenou dobu |
| 9 | reverzace - spojením s GND |
| 10 | motor se zastaví, za nastavenou dobu -brzda |
| 11 | nezapojen |
| 12 | nezapojen |
| 13 | nezapojen |
| 14 | GND |

Tab.P3 Popis funkce jednotlivých pinů konektorů DC měniče PM36201.

| FSAT | FREQ | SLIP | Giri | C | V | IBATT | IMOT | P.R | P.Batt | Rend | S2 | S3 |
|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|--------|------|-------|------|
| Hz | Hz | Hz | Rpm | Kgm | Volt | Amp | Amp | KW | KW | % | min | % |
| 40 | 30,3 | 2,0 | 851 | 1,07 | 24,1 | 64,0 | 100,8 | 0,93 | 1,54 | 60,5 | 29,1 | 43,4 |
| 40 | 30,3 | 2,9 | 822 | 1,46 | 24,3 | 80,6 | 108,9 | 1,23 | 1,96 | 62,7 | 25,1 | 38,9 |
| 40 | 30,2 | 4,0 | 788 | 1,85 | 24,2 | 102,1 | 125,1 | 1,50 | 2,47 | 60,5 | 18,6 | 30,7 |
| 40 | 30,3 | 5,1 | 757 | 2,06 | 24,3 | 114,8 | 138,4 | 1,60 | 2,80 | 57,3 | 14,4 | 24,7 |
| 40 | 30,3 | 7,1 | 697 | 1,96 | 25,9 | 143,6 | 151,2 | 1,41 | 3,72 | 37,8 | 11,0 | 19,5 |
| 40 | 30,3 | 7,9 | 670 | 2,51 | 24,4 | 156,3 | 175,9 | 1,73 | 3,82 | 45,3 | 5,9 | 10,7 |
| 40 | 40,1 | 1,7 | 1154 | 1,12 | 24,3 | 82,6 | 106,1 | 1,32 | 2,00 | 65,9 | 26,4 | 40,4 |
| 40 | 40,2 | 4,0 | 1085 | 2,17 | 23,8 | 150,2 | 141,3 | 2,42 | 3,58 | 67,6 | 13,6 | 23,5 |
| 40 | 40,2 | 8,3 | 955 | 2,93 | 24,3 | 253,8 | 213,3 | 2,87 | 6,16 | 46,6 | 1,1 | 2,0 |
| 40 | 40,2 | 5,0 | 1055 | 2,35 | 24,2 | 163,2 | 149,2 | 2,54 | 3,95 | 64,4 | 11,5 | 20,3 |
| 40 | 40,2 | 5,9 | 1028 | 2,61 | 24,3 | 186,4 | 169,0 | 2,75 | 4,53 | 60,8 | 7,2 | 13,0 |
| 40 | 40,2 | 8,2 | 961 | 2,86 | 23,5 | 223,0 | 202,4 | 2,82 | 5,23 | 53,9 | 1,7 | 2,8 |
| 40 | 50,2 | 1,1 | 1473 | 0,50 | 24,3 | 41,0 | 63,2 | 0,75 | 1,00 | 75,6 | 59,8 | 69,8 |
| 40 | 50,2 | 2,6 | 1429 | 1,05 | 24,1 | 80,6 | 82,9 | 1,54 | 1,95 | 78,9 | 40,4 | 54,8 |
| 40 | 50,2 | 4,5 | 1371 | 1,57 | 24,3 | 124,3 | 116,1 | 2,21 | 3,02 | 73,1 | 22,0 | 35,1 |
| 40 | 50,2 | 6,5 | 1312 | 1,92 | 24,2 | 160,0 | 145,8 | 2,59 | 3,87 | 66,9 | 12,4 | 21,6 |
| 40 | 50,2 | 7,3 | 1287 | 2,02 | 24,4 | 171,7 | 157,7 | 2,68 | 4,19 | 63,8 | 9,5 | 17,0 |
| 40 | 50,2 | 8,7 | 1246 | 2,14 | 24,0 | 191,7 | 175,8 | 2,74 | 4,60 | 59,5 | 5,9 | 10,8 |
| 40 | 60,1 | 1,5 | 1760 | 0,49 | 24,2 | 42,5 | 53,0 | 0,89 | 1,03 | 86,5 | 74,8 | 79,0 |
| 40 | 60,1 | 3,9 | 1688 | 1,05 | 24,3 | 91,3 | 87,8 | 1,83 | 2,22 | 82,4 | 36,9 | 51,5 |
| 40 | 60,1 | 6,6 | 1605 | 1,48 | 23,9 | 139,7 | 125,7 | 2,44 | 3,34 | 72,8 | 18,4 | 30,4 |
| 40 | 60,1 | 9,7 | 1513 | 1,74 | 24,0 | 180,7 | 162,2 | 2,70 | 4,34 | 62,2 | 8,5 | 15,4 |
| 40 | 70,2 | 1,5 | 2061 | 0,39 | 24,3 | 35,7 | 44,6 | 0,83 | 0,87 | 95,6 | 91,9 | 87,3 |
| 40 | 70,2 | 2,8 | 2022 | 0,63 | 24,1 | 59,3 | 61,3 | 1,31 | 1,43 | 91,4 | 62,2 | 71,4 |
| 40 | 70,2 | 5,4 | 1944 | 1,01 | 24,2 | 102,8 | 95,8 | 2,02 | 2,49 | 81,2 | 31,9 | 46,4 |
| 40 | 70,2 | 9,5 | 1820 | 1,38 | 24,1 | 153,6 | 140,4 | 2,57 | 3,71 | 69,3 | 13,9 | 23,9 |
| 40 | 80,1 | 1,5 | 2358 | 0,34 | 24,2 | 33,7 | 40,7 | 0,81 | 0,82 | 99,8 | 101,9 | 91,5 |
| 40 | 80,1 | 3,0 | 2314 | 0,53 | 24,1 | 54,5 | 55,4 | 1,25 | 1,32 | 95,4 | 70,8 | 76,7 |
| 40 | 80,1 | 4,7 | 2261 | 0,75 | 24,3 | 81,6 | 78,3 | 1,75 | 1,98 | 88,2 | 44,1 | 58,0 |
| 40 | 80,2 | 7,1 | 2192 | 0,96 | 24,3 | 110,6 | 102,6 | 2,17 | 2,69 | 80,8 | 28,1 | 42,4 |
| 40 | 80,1 | 9,5 | 2118 | 1,13 | 24,2 | 137,3 | 126,3 | 2,46 | 3,32 | 73,9 | 18,2 | 30,1 |
| 40 | 80,1 | 11,5 | 2057 | 1,20 | 24,3 | 152,4 | 143,3 | 2,54 | 3,70 | 68,7 | 13,1 | 22,6 |
| 40 | 90,1 | 2,4 | 2633 | 0,37 | 24,1 | 41,8 | 44,1 | 0,99 | 1,01 | 98,6 | 93,1 | 87,9 |
| 40 | 90,2 | 3,9 | 2587 | 0,53 | 24,2 | 61,8 | 60,6 | 1,42 | 1,50 | 94,8 | 63,1 | 72,0 |
| 40 | 90,2 | 6,7 | 2505 | 0,75 | 24,3 | 93,8 | 87,0 | 1,94 | 2,28 | 84,8 | 37,5 | 52,0 |
| 40 | 90,2 | 9,0 | 2436 | 0,91 | 24,2 | 118,0 | 108,5 | 2,28 | 2,86 | 79,7 | 25,3 | 39,1 |
| 40 | 90,2 | 11,9 | 2350 | 1,01 | 24,3 | 144,1 | 133,1 | 2,44 | 3,50 | 69,8 | 16,0 | 27,0 |
| 40 | 100,2 | 4,1 | 2884 | 0,45 | 24,1 | 57,4 | 55,9 | 1,34 | 1,39 | 96,7 | 70,0 | 76,2 |
| 40 | 100,2 | 7,6 | 2780 | 0,71 | 24,2 | 96,7 | 88,6 | 2,03 | 2,34 | 86,7 | 36,4 | 51,0 |
| 40 | 100,2 | 12,4 | 2636 | 0,89 | 24,1 | 132,4 | 123,7 | 2,41 | 3,20 | 75,4 | 19,1 | 31,3 |
| 40 | 120,1 | 6,7 | 3404 | 0,49 | 24,2 | 72,8 | 68,5 | 1,70 | 1,76 | 96,4 | 53,5 | 65,5 |
| 40 | 120,2 | 8,9 | 3338 | 0,57 | 24,3 | 89,9 | 83,6 | 1,97 | 2,18 | 90,3 | 39,9 | 54,3 |
| 40 | 120,1 | 10,6 | 3285 | 0,63 | 24,3 | 103,3 | 95,0 | 2,13 | 2,51 | 84,7 | 32,3 | 46,9 |

Tab.P4 Pracovní body AC G1150400.



Obr.P2 AC měnič AC-1.

| Základní technická data AC měniče AC-1. | |
|---|--|
| Rekuperační brzdění. | |
| Napětí | 24 – 36 – 48V |
| Výkon motoru | 0,7 – 2,5 kW |
| Max. proud | 250 A/ 2,5 min |
| Zesilovač | 10% z maximálního proudu na několik vteřin |
| Frekvence | 8 kHz |
| Venkovní teplota | -30° ... +40° |
| Maximální teplota měniče (při plném výkonu) | 75 °C |
| Další technické vlastnosti: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ absolutní proporcionální jízdní vlastnosti ▪ automatické řízení otáček s rekuperačním elektrickým brzděním při minimální změně napětí ▪ snímání otáček (zpětná vazba) ▪ datová sběrnice CAN ▪ řízení mikroprocesorem ▪ programovatelný přes sériovou linku (programovací konzola, PC) ▪ interní počítačlo provozních hodin ▪ monitorování teploty + teplotní ochrana ▪ ukládání poruch do paměti (diagnostika pomocí LED, programovací konzoly nebo PC) ▪ odpovídá evropské bezpečnostní normě EN 1175 ▪ IP54 | |
| Přehled základních nastavení: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ maximální proud motorem ▪ brzdící intenzity při částečném uvolnění akceleračního pedálu ▪ brzdící intenzity při návratu akceleračního pedálu do nulové polohy ▪ brzdící intenzity při změně směru jízdy ▪ brzdící intenzity při aktivaci redukce rychlosti ▪ maximální rychlost vpřed ▪ maximální rychlost vzad | |

Tab.P5 Základní technická data AC měniče AC-1.

| Popis funkce jednotlivých pinů konektorů AC měniče AC-1. | | |
|---|----------|---|
| A1 | NLC | záporný cívký hlavního stykače |
| A2 | PLC, PEB | kladný cívký hlavního stykače a cívký elektromechanické brzdy |
| A3 | NBRAKE | výstup ovládání cívký elektromechanické brzdy, -Bat. Max. 3A |
| A4 | NPC | záporný cívký stykače čerpadla |
| A5 | PPC, PEV | kladný cívký stykače čerpadla a cívký elektorventilu |
| A6 | NEV | záporný cívký elektroventilu |
| A7 | CAN-L | nízká úroveň can-bus napětí I/O |
| A8 | NPOTB | baterie |
| A9 | KODÉR | přírůstkový snímač polohy (viz. kapitola 3.6) |
| A10 | KODÉR | přírůstkový snímač polohy (viz. kapitola 3.6) |
| A11 | HM | výstup pro pohánění motohodin. Když jsou hodiny aktivní, tento vstup vysílá do +baterie signál. Maximální proud – 3A. |
| A12 | BATT | baterie |
| A13 | SR1 | vstup redukce rychlosti 1. Aktivní – spínač otevřen. |
| A14 | SR2 | vstup redukce rychlosti 2. Aktivní – spínač otevřen. |
| A15 | SR3 | vstup redukce rychlosti 3. Aktivní – spínač otevřen. |
| A16 | 12V | tento výstup poskytuje 12ti voltový signál pro MDI PRC, jestliže se jedná o tuto verzi. Maximální proud – 100mA. |
| A17 | CAN-H | can-bus H napětí I/O |
| A18 | CPOTB | brzda kluzného kontaktu potenciometru |
| A19 | KODÉR | přírůstkový snímač polohy (viz. kapitola 3.6) |
| A20 | KODÉR | přírůstkový snímač polohy (viz. kapitola 3.6) |
| B1 | KEY | připojit ke zdroji přes mikrospínač klíče (KEY) s 10A pojistkou |
| B2 | CM | společný pro MIKROSPÍNAČE FW / BW / SR1 / SR2 / SR3 / TILLER / H&S / BELLY / LIFTING / LOWERING |
| B3 | TILLER | vstup oje. musí být připojen k mikrospínači oje |
| B4 | H&S | vstup Hard&Soft. Připojit k mikrospínači Hard&Soft |
| B5 | BACKWARD | vstup zpětného chodu. Připojit k mikrospínači zpětného chodu |
| B6 | FORWARD | vstup směru vpřed. Připojit k mikrospínači směru vpřed |
| B7 | BELLY | vstup funkce rychlá inverze. Připojit k mikrospínači mrtvého muže |
| B8 | LOWERING | vstup spouštění |
| B9 | LIFTING | vstup zdvihu |
| B10 | CPOT | akcelerátor |
| B11 | NPOT | záporný jednotky akcelerátoru, testován diagnostikou pro rozpojení |
| B12 | PPOT | potenciometr kladný: 10V výstup, náboj musí být >1k _Ω |
| C1 | PCLRxD | sériová linka – příjem kladný |
| C2 | NCLRxD | sériová linka – příjem záporný |
| C3 | PCLTxD | sériová linka – vysílání kladné |
| C4 | NCLTxD | sériová linka – vysílání záporné |
| C5 | GND | napájení konzoly |
| C6 | 12V | napájení konzoly |
| C7 | FLASH | připojit k C8, programování FLASH paměti |
| C8 | FLASH | připojit k C7, programování FLASH paměti |

Tab.P6 Popis funkce jednotlivých pinů konektorů AC měniče AC-1.